

VDI

K

KUNSTSTOFFTECHNIK

# **Spritzgießen 2016**



KUNSTSTOFFTECHNIK

# **Spritzgießen 2016**

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 <http://dnb.ddb.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 <http://dnb.ddb.de>.

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2016

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

Printed in Germany

ISBN 978-3-18-234344-8



VDI-Programmausschuss Spritzgießtechnik

## **Tagungsleitung**

**Bernhard Hoster**, *Leiter Technologiemanagement Kunststoffzentrum,  
GIRA Giersiepen GmbH & Co. KG, Radevormwald*

**Dr. Thomas Zipp**, *Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing.,  
Geschäftsführender Gesellschafter, Weber GmbH & Co. KG,  
Kunststofftechnik + Formenbau, Dillenburg*

**Dr.-Ing. Oliver M. Becker**, *Executive Director Process Innovation,  
Advanced Product Development & Sales, Yanfeng Europe Automotive  
Interior Systems Limited & Co. KG, Neuss*

**Dr.-Ing. Peter Braun**, *Geschäftsführer,  
EWIKON Heißkanalsysteme GmbH, Frankenberg*

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

**Prof. Ansgar Jaeger**, *Fachhochschule Würzburg-Schweinfurt,  
Würzburg (Vorsitz)*

**Kerstin Krallmann**, *MWV Calmar GmbH, Hemer*

**Dr.-Ing. Karl Kuhmann**, *Director Processing Technology and  
Development, Evonik Resource Efficiency GmbH, Marl*

**Prof. Dr.-Ing. Georg Steinbichler**, *Leitung Forschung und Entwicklung  
Technologien, ENGEL AUSTRIA GmbH, Schwertberg, Österreich*

**Dr. Marco Wacker**, *UVEX Arbeitsschutz GmbH, Fürth*

**Martin Wanders**, *BU High Performance Materials, Global Application  
Development, LANXESS Deutschland GmbH, Dormagen*

**Dipl.-Ing. Martin Würtele**, *Leiter Technologieentwicklung, KraussMaffei  
Technologies GmbH, München*



# Inhalt

## **Spritzgießen: Marktübersicht und Branchenbericht**

### **Industrie 4.0 – Ein pragmatischer Ansatz zur Einordnung**

*Prof. Dr.-Ing. T. Frank, FH Südwestfalen, Soest*

1

## **Fortschritte in der Prozesstechnik – Kurzberichte aus der Forschung**

### **Verarbeitung von Thermoplasten mit Langfasern und Endlosfasern**

*Prof. Dr.-Ing. C. Bonten, M.Eng. T. Koslowski, Institut für Kunststofftechnik, Universität Stuttgart*

15

### **Spritzgießdirektcompoundierung (SGDC) – Produktspezifische Materialentwicklung im Spritzgießprozess**

*Prof. Dr.-Ing. E. Moritzer, Y. Martin, M.Sc., Universität Paderborn, Kunststofftechnik Paderborn (KTP); Dr.-Ing. E. Müller, Behr-Hella Thermocontrol*

27

### **Spritzgegossene Sandwichstrukturen – Leichtbau und effiziente Produktion vereint**

*Prof. Dr.-Ing. V. Altstädt, Neue Materialien Bayreuth GmbH, Bayreuth*

41

## **Produktionstechnologien im Wandel**

### **3D-Prozesssimulation bei Spritzgieß-Sonderverfahren – Möglichkeiten und Grenzen**

*Dipl.-Ing. M. Kurz, SimpaTec GmbH, Reutlingen*

55

### **Spritzgießen & Thermoformen: Neue Ansätze für hochwertige Oberflächen**

*Dr.-Ing. M. Schuck, HBW-Gubesch Thermoforming GmbH, Wilhelmsdorf*

63

### **Additive Manufacturing: Sinnvolle Anwendungsbereiche vs. Manufacturing Hype**

*Dipl.-Wirtsch.-Ing. (TU) F. Müller, EOS GmbH Electro Optical Systems, Krailling*

71

### **Möglichkeiten und Grenzen der 3D-Drucker für Kleinserien – Ist das Unmögliche bereits möglich?**

*J. Kasemann, Coffee Solution GmbH, Krailling*

79

## **Fertigung von funktionalen Bauteilen**

<b>Smart / dekorativ / funktional – Maßgeschneiderte FIM Oberflächen</b> <i>Dipl.-Ing. D. Lange, BÖ-LA Siebdrucktechnik GmbH, Radevormwald</i>	81
<b>Füllsimulation beim Mikrospritzgießen – Praktische Aspekte</b> <i>Dr.-Ing. G. Jüttner, Dipl.-Wi.-Ing. C. Löser, Kunststoff-Zentrum in Leipzig gGmbH, Leipzig</i>	99
<b>Laser Direct Structuring – 3D Schaltungsträger für Elektromechanische Anwendungen</b> <i>Ing. F. van Vehmendahl, Mitsubishi Engineering-Plastics, Geleen, Niederlande</i>	119
<b>Trends in Displaytechnik und Optoelektronik</b> <i>Dr.-Ing. J. Ackermann, Evonik Performance Materials GmbH, Darmstadt</i>	141
<b>Trends und Strategien zur Individualisierung des Automobilinterieurs</b> <i>Dipl.-Wirtsch.-Ing. I. Erler, Yanfeng Automotive Interiors</i>	155
<b>3D Barrier Coating – Markt für kostengünstige Long-Shelf-Life-Verpackung öffnet sich für Spritzgießer</b> <i>Dipl.-Kfm. W. Czizegg, Cavonic GmbH, Engen</i>	165
<b>Realisierbare Werkzeuge mittels additiver Fertigungsstrategien</b> <i>Dipl.-Phys. R. Derntl, Hermle Maschinenbau GmbH, Ottobrunn</i>	169
<b>Schaumspritzgießen: Aktuelle Trends und neue Herausforderungen</b> <i>A. Handschke, KraussMaffei Technologies, München</i>	183

## **Kleinserien wirtschaftlich fertigen**

<b>Präzise optische Komponenten durch innovative Werkzeugkonzepte</b> <i>Prof. Dr.-Ing. C. Hopmann, Dipl.-Ing. M. Theunissen, M. Röbig M. Sc., Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV) an der RWTH Aachen</i>	195
<b>Kleinserien wirtschaftlich fertigen – Kombinationen aus Idee, Mensch und Maschine</b> <i>G. Weiss, H. Dietle, PPS Dietle GmbH, Haiterbach</i>	207
<b>Werkzeugkonzepte für die Kleinserie</b> <i>Dipl.-Ing. J. Henzler, Robert Hofmann GmbH, Lichtenfels</i>	217

## ***Spritzgießen Quo Vadis?***

### **Material follows function – Zukunftsperspektiven für die Kunststoffe von morgen**

*Dipl.-Ing. (FH) E. Foltin, Foltin Future Consulting, Sinzig*

223

### **Zukunft gestalten – Strategisches Design von Kunststoffbauteilen**

*S. Schneider, Miele & Cie. KG, Gütersloh*

225



# Industrie 4.0 – Ein pragmatischer Ansatz zur Einordnung

Prof. Dr.-Ing. T. Frank, FH Südwestfalen, Soest

## Kurzfassung

Das Zukunftsprojekt „Industrie 4.0“ ist Bestandteil der Hightech-Strategie 2020 der deutschen Bundesregierung zur Sicherung und Stärkung des Produktionsstandorts Deutschland. Ziel ist es, den Trend zum Outsourcing und zur Dienstleistung zu stoppen. Dieser neue Denkansatz reagiert damit auf die veränderten Rahmenbedingungen enger, dynamischer Märkte, die vom „Hyperwettbewerb“ geprägt sind. Der nachfolgende Beitrag diskutiert dabei einen pragmatischen Ansatz zur Einordnung des Denkansatzes „Industrie 4.0“ in Bezug auf dessen Transformationsgeschwindigkeit.

## 1. Grundidee der Industrie 4.0

Um die Grundidee der Industrie 4.0 zu verstehen, hilft ein Blick in die Geschichte. Begonnen hat der Prozess der Industrialisierung (Industrie 1.0) mit der Einführung mechanischer Produktionsanlagen, welche mit Hilfe eines Transmissionsriemens durch eine Dampfmaschine angetrieben wurden. Große Bedeutung für diese Zeit hatte der Schotte James Watt (1736-1819) mit seiner Weiterentwicklung der Dampfmaschine Ende des 18. Jahrhunderts.

Die zweite Stufe der Industrialisierung (Industrie 2.0) entsteht durch die arbeitsteilige Massenproduktion von Gütern mittels Fließbandfertigung nach Frederick Taylor (1856-1915) oder Henry Ford (1863-1947), insbesondere mithilfe der Elektrizität seit Beginn des 20. Jahrhunderts.

Die dritte industrielle Revolution (Industrie 3.0) wurde durch die Einführung der automatisierten Massenproduktion vor allem durch den Einsatz von Elektronik und Informationstechnologien möglich. Elektrische Einzelantriebe werden mit Hilfe von Computern gesteuert und werden heute beispielsweise Werkzeugmaschinen oder Roboter.

Zurzeit stehen wir an der Schwelle zur vierten industriellen Revolution (Industrie 4.0). Der Begriff stammt aus der Hightech-Strategie 2020 der deutschen Bundesregierung zur Sicherung

rung und Stärkung der deutschen Industrie im Jahre 2011. Ziel ist die intelligente Fabrik (engl. Smart Factory) basierend auf der Idee des Internet der Dienste bzw. der Dinge.

Aber reicht diese historische Betrachtung als Erklärung? Ist damit die Frage, warum wir Industrie 4.0 brauchen bzw. auf welche Veränderung Industrie 4.0 reagiert, schon ausreichend beantwortet? Die Antwort ist nein.

Eine tiefgründige Antwort wird mit Hilfe der Abbildung 1 „Taylor-Wanne“ möglich. Bei der Beobachtung der Komplexität bzw. Dynamik der Industrie über die Zeit ergibt sich die dargestellte Kurve, bezeichnet als „Taylor-Wanne“. Sie zeigt drei Abschnitte: Hohe Komplexität/Dynamik in lokalen Märkten, niedrige Komplexität/Dynamik (Trägheit) in globalen Märkten und hohe bzw. ständig steigende Komplexität/Dynamik in den heutigen globalen Märkten. Dabei steht Abschnitt 2 für die Zeit der Industrie 1.0 und 2.0 und Abschnitt 3 für die Zeit der Industrie 3.0 und 4.0. Aus globalen, trägen Märkten sind schon lange globale, dynamische Märkte geworden. Die steigende Komplexität/Dynamik entsteht durch die starke Zunahme des Wettbewerbs, der Baureihen, der Varianten, der zur Verfügung stehenden Informationen, der logistischen Möglichkeiten bis hin zu alternativer Geschäftsmodelle. Dabei ist hohe Komplexität oder Dynamik nicht gut oder schlecht, sondern einfach eine Tatsache der heutigen Zeit. Eine historische Tatsache, der sich die Unternehmen mit der richtigen Art der Produktions- oder Unternehmensorganisation stellen müssen.



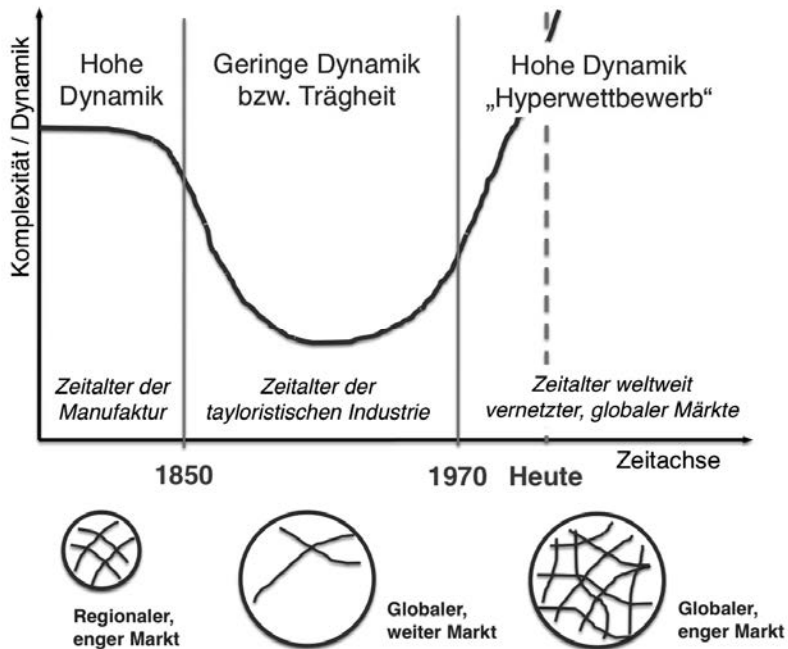


Bild 1: Die Taylor-Wanne in Anlehnung an [1]

## 2. Politische Motivation

Das Thema „Industrie 4.0“ ist politisch motiviert und wurde durch die deutsche Bundesregierung zum ersten Mal im Aktionsplan zur Hightech-Strategie 2020 als „Zukunftsprojekt Industrie 4.0“ im Jahr 2011 verankert. Der Abschlussbericht des dazugehörigen Arbeitskreises aus dem Jahr 2013 dient als erste wichtige Umsetzungsempfehlung für das Zukunftsprojekt „Industrie 4.0“ und dient als Roadmap für das Thema bzw. als neues Leitbild für die Industrie [2].

Aber warum ist es notwendig, die deutsche Wirtschaft zu stärken? Die Industrie in Deutschland ist neben der in China und Japan mit über 20 Prozent des Bruttoinlandsprodukts (BIP) stärker fokussiert auf das Thema Fertigung und Technologie als andere Industrienationen wie beispielsweise die USA. Unternehmen, die hinter dieser Fokussierung stehen, sind z.B. die großen deutschen Automobilkonzerne wie Mercedes-Benz, Volkswagen, BMW oder

deren Zulieferer wie Bosch, Continental, Brose, Hella, Ina, Freudenberg, ZF oder viele mehr. Sowie deutsche Technologiekonzerne: z.B. Siemens oder Thyssen-Krupp. Das Rückrad dahinter bilden aber viele mittelständische Unternehmen, die gerne auch als „Hidden Champions“ bezeichnet werden, wie z.B. Trumpf, Index, Würth, Kärcher, Heidenhain, Wilo, Vorwerk, Otto Bock, Tente, Claas, Hobby oder noch viele, viele mehr.

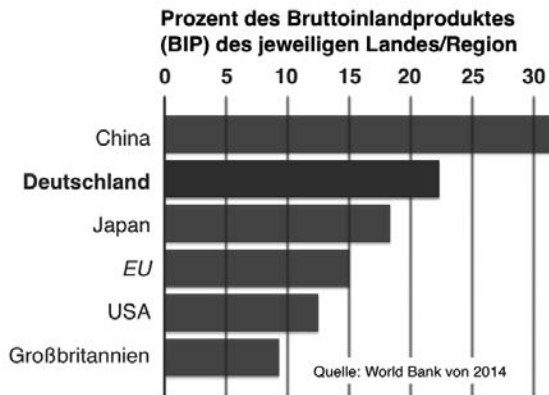


Bild 2: Fokussierung einer Industrieregion auf das Thema Fertigung in Prozent des jeweiligen Bruttoinlandproduktes (BIP) [3]

Aber welche Bedeutung kommt diesen deutschen Unternehmen im weltweiten Vergleich zu? In Abbildung 3 ist so ein Vergleich über den Unternehmenswert dargestellt. Sicherlich ist dieses nur ein möglicher Ansatz neben anderen wichtigen Vergleichen wie Umsatz, Anzahl oder Patenten. Was aber deutlich wird, ist, dass deutsche Unternehmen im Vergleich zu amerikanischen oder chinesischen Unternehmen an Bedeutung verlieren.

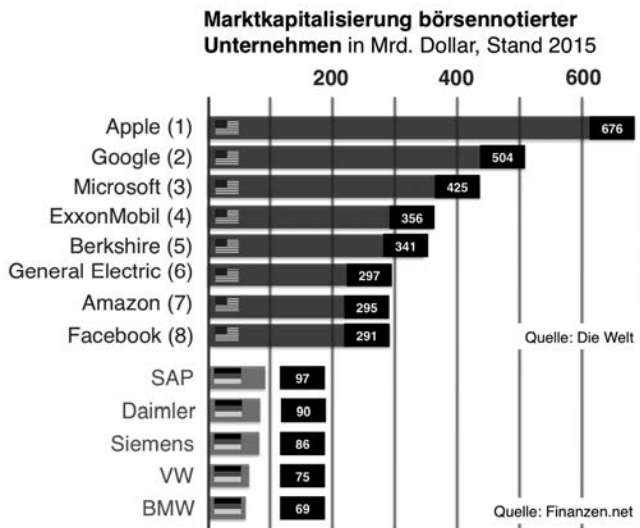


Bild 3: Unternehmenswerte amerikanischer High-Tech-Produkt-Spezialisten versus -deutsche Fertigungs- und Technologie-Spezialisten [3]

Und genau hier knüpft die These der Bundesregierung an, ob das Industrieland Deutschland nicht Gefahr läuft, seinen Lebensstandard langfristig zu verlieren, wenn es nicht gelingt, in die Zukunft der deutschen Industriebetriebe und damit in deren Produktion zu investieren.

### 3. Digitalisierung als Innovationstreiber

In der Studie „Zukunftsbild Industrie 4.0“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung von 2012 wird eine mögliche Zukunft der industriellen Produktion des Jahres 2025 aufgebaut [4]. In Abbildung 4 sind wichtige Elemente dieser Vision dargestellt, durch die eine intelligente und vernetzte Produktion (Industrie 4.0) entsteht. Im Mittelpunkt steht dabei das Cyber Physical System (CPS). Definition nach Fraunhofer IIS: „Bei Cyber Physical Systems (CPS) handelt es sich um verteilte, miteinander vernetzte und in Echtzeit kommunizierende, eingebettete Systeme, welche mittels Sensoren die Prozesse der realen, physischen Welt überwachen und durch Aktuatoren steuernd bzw. regulierend auf diese Einwirken. Sie zeichnen sich zudem häufig durch eine hohe Adaptabilität und die Fähigkeit zur Bewältigung komplexer Datenstrukturen aus.“



Bild 4: Elemente der Industrie 4.0 aus der Studie „Zukunftsbild Industrie 4.0“ [4]

Durch das Zusammenwachsen der digitalen und realen Welt wird die zunehmende Dynamik und Komplexität, z.B. durch eine hohe Zahl an Produktvarianten oder sogar die Herstellung kundenindividualisierter Produkte bei geringen Kosten, sicher beherrschbar. Selbst bei unerwarteten Störungen erfolgt eine Anpassung der Produktion schnell und präzise. Dabei steht der Mensch im Mittelpunkt dieser Produktion, so dass ein technisch-humanzentriertes Produktionssystem entsteht. Dieses hat Auswirkungen auf die Zufriedenheit der Mitarbeiter und schafft ein positives Klima in der Organisation [4].

#### 4. Revolution oder Evolution?

Elementare Kennzeichen einer Revolution sind laut Duden insbesondere eine „umwälzende, bisher Gültiges, [oder] Bestehendes [...] verdrängende grundlegende Neuerung“ und eine „tief greifende Wandlung“. In diesem Kontext versteht sich eine Revolution als eine fundamentale Veränderung, die jeden Teil der Gesellschaft unumgänglich betrifft und die Zukunft der Menschen nachhaltig gestaltet.

Im Gegensatz hierzu sind laut Duden elementare Kennzeichen einer Evolution eine „langsame, bruchlos fortschreitende Entwicklung besonders großer oder großräumiger Zusammenhänge“.

In dem Buch: „Die dritte industrielle Revolution. Wie die Mikroelektronik unser Leben verändert“ prägt Dieter Balkhausen 1978 den Begriff der digitalen Revolution, der ausgelöste Umbruch durch die Digitalisierung und Computer, der einen Wandel sowohl der Technik als auch (fast) aller Lebensbereiche bewirkt hat, ähnlich wie die Industrielle Revolution 200 Jahre zuvor [5].

Eine Folge dieser digitalen Revolution ist das Internet. Die Bundeszentrale für politische Bildung schreibt 2008 in ihrem Artikel „Die Internet-Revolution“: „Als es 1992 mit dem World-Wide-Web in das öffentliche Bewusstsein trat, war das Internet noch eine computerzentrierte Technologie, die im beginnenden Informationszeitalter ein nützliches Hilfsmittel darstellte. Keine fünfzehn Jahre später ist der Siegeszug der Technologie allumfassend, Webseiten und E-Mails als Kommunikationsmittel unverzichtbar und mit dem Web2.0 und mobilen Applikationen hat sich die amerikanische Erfindung des Internets so schnell wie kein Kommunikationsmedium in der Geschichte der Menschheit fundamental in den Alltag einer globalen Welt eingeklinkt.“ [6]

Das Internet ist also nach der digitalen Revolution die weitere Ausbaustufe dieser Revolution und prägt unser modernes Leben, wie keine zweite Technologie. Beispielsweise entstehen durch die Kombination aus klassischem Handel und Internet völlig neue Geschäftsmodelle. Beispiel hierfür ist das weltweit tätige Erfolgsunternehmen Amazon. Gestartet als Online-Buchshop ist es heute ein Online-Handelshop bzw. eine Online-Handelsplattform, welche die traditionellen Branchen kräftig aufmischt.

Die abschließende Frage ist jedoch noch offen. Ist jetzt Industrie 4.0 eine Revolution oder Evolution der Produktion. Um diese zu beantworten, müssen jedoch die wichtigsten Veränderungen der deutschen Produktion seit 1990 nachvollzogen werden.

## **5. Lean Production – Grundlage für Industrie 4.0**

Der Begriff „Lean Production“ wird durch eine Studie des MIT- Massachusetts Institute of Technology in Boston – von 1990 geprägt. In dieser empirischen Studie untersuchten James P. Womack, Daniel T. Jones und Daniel Roos die Produktivität bzw. die Produktivitätsrückstände der europäischen und amerikanischen Automobilhersteller zu den japanischen Her-

stellern, aber vor allem zu dem japanischen Hersteller Toyota und seinem Produktionssystem [7].

Dabei wird der Begriff „Lean Production“ im Deutschen oft vereinfacht durch den Begriff „schlanke Produktion“ übersetzt oder bezeichnet. Dieser Begriff steht vor allem für eine flexible, synchrone, leistungsfähige und effiziente Produktion. Also eine Produktionsform, die für eine variantenreiche, kundenorientierte Massen- bzw. Serienherstellung ideal geeignet ist.

Eines der bedeutensten Elemente der Lean Philosophie ist die dezentrale Pull- oder Zieh- oder Hol-Steuerung, damit es zu keiner Überproduktion kommt und nur genau der Kundenbedarf (engl. Just-in-Time, JIT) produziert wird [8]. Ziel ist es, dass die Teile durch die Produktion fließen, ohne dass sich Wartezeiten oder Bestände vor den Arbeitsplätzen bilden. Ergebnis ist eine minimale Durchlaufzeit, d.h. das eingesetzte Kapital fließt in minimaler Zeit (und mit Gewinn) zum Unternehmen zurück. Dabei steckt das Wissen der Steuerung des Materiales in den jeweiligen Prozessen, wobei mit Hilfe des Pull-, Zieh- oder Hol-Prinzips das gefertigte oder montierte Teil auf Anforderung eines nachfolgenden Arbeitsplatzes gezogen oder geholt wird. Ziel ist die weitgehende Selbststeuerung der Prozesse! Prozesse sind dabei Herstellungs- aber auch Materialversorgungsprozesse. Das dezentrale Wissen des Flusses steckt also in den Prozessen und nicht mehr in einer zentralen Planung und Steuerung der Produktion. Sicherlich gibt es in der Praxis oft Mischformen, aber die Frage lautet jetzt: Wie dezentral ist meine Produktionssteuerung schon? Oder wie kann meine zentrale Steuerung meine dezentrale Hauptsteuerung unterstützen?

## Entwicklung der Kennzahlen von Porsche von 1985-2006

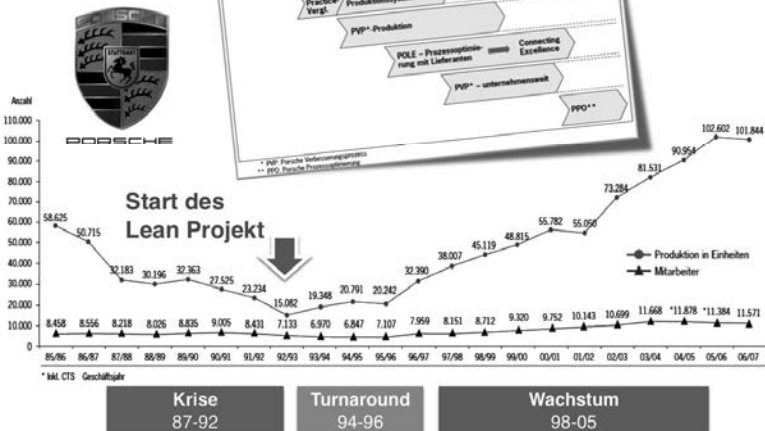


Bild 5: Produktions- und Mitarbeiterkennzahlen der Porsche AG zwischen den Jahren 1985 und 2006 [9]

Das Beispiel Porsche steht stellvertretend für die deutsche Automobilindustrie zu Beginn der Neunziger Jahre. Durch die konsequente Einführung und Umsetzung der Lean Methoden (z.B. Pull-Steuerung, One-Piece-Flow, Kanaban-Supermarkt-Prinzip, kontinuierliche Verbesserung usw.) nach dem Vorbild von Toyota drehte sich das Blatt bei allen deutschen Autobauern [10]. Abbildung 5 zeigt die Ergebnisse dieser Restrukturierung bei Porsche, die im Frühjahr 1992 durch Wendelin Wedeking, der im Oktober 1991 Vorstandsvorsitzender wurde, und seinem japanischen Sensei Chihiro Nakao eingeleitet worden ist. Chihiro Nakao gehörte dem führenden japanischen Beratungsbüro für schlanke Produktionen Shin-Gijutsu an. Shin-Gijutsu ist durch fünf der engsten Mitarbeiter des ehemaligen Toyota Produktionsleiters Taiichi Ohno Mitte der achtziger Jahre gegründet worden. Die Steigerung der Qualität und Flexibilität bei gleichzeitig enormer Produktivitätssteigerung stehen im Mittelpunkt [11]. Beispielhaft zeigt Abbildung 6 die Verbesserungen der dazugehörigen Durchlaufzeit im Montagebereich um 71%, geprägt durch die schrittweise Eliminierung der existierenden Verschwendungen [9] [11].

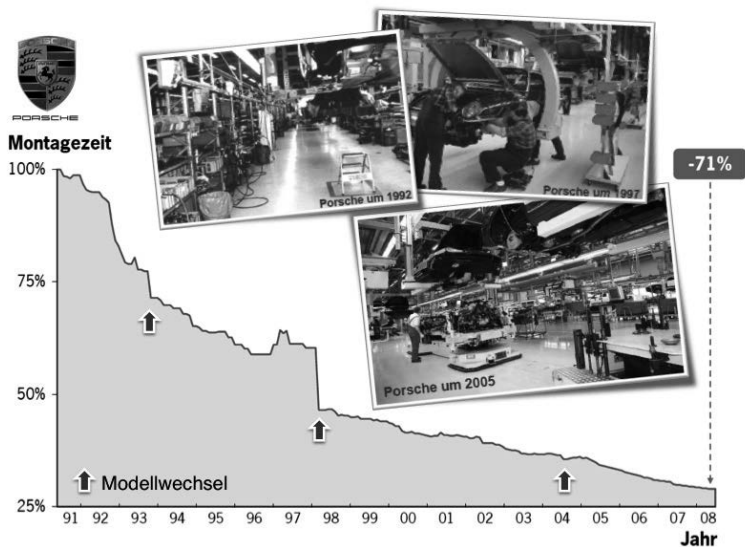


Bild 6: Montagezeitreduktion von 71% bei Porsche in den Jahren 1991 bis 2008 als Beispiel für die Produktivitätssteigerung seit dem Start des Lean-Projekts [9]

Nach dem Vorbild der deutschen Automobilindustrie erfolgte die Umsetzung der Lean Methoden zuerst bei vielen deutschen Automobilzulieferern und anschließend bei vielen weiteren deutschen Industrieunternehmen. In dem dazugehörigen Transformationsprozess zeigt sich, dass neben der Entwicklung des technischen Systems die Veränderung der dazugehörigen Organisation von enormer Bedeutung ist [12]. Beispiel für die Veränderung der Organisation werden in [13] oder [14] diskutiert.

Die Produktion hat sich seit dieser Zeit schrittweise evolutionär weiterentwickelt und ist heute i.d.R. hochgradig automatisiert und IT-vernetzt bzw. IT-gesteuert. Und dabei sind die Maßnahmen, die sich aus den Denkansätzen der Industrie 4.0 ergeben, ein Bestandteil dieses kontinuierlichen (evolutionären) Verbesserungsprozesses von Lean. Ein schrittweise Veränderungen, in der die produzierenden Unternehmen Zeit haben, die positiven Möglichkeiten von mehr Intelligenz und Vernetzung in den Produktionsmitteln bzw. im Produktionsumfeld zu nutzen. Der Denkansatz „Industrie 4.0“ ist somit eine enorme Chance für die Wirtschaft bzw. Gesellschaft und keine Gefahr.



## 6. Disruptive Systeme / Produkte – Die wirkliche Gefahr!

Die wirkliche Gefahr droht durch disruptive Situationen mit ihren Break-Through-Innovationen vor allem auf der Produkt- und Geschäftsmodellseite. Etablierte Unternehmen scheitern am Hyperwettbewerb, ihrer Trägheit und ihrer fehlenden Anpassungsfähigkeit [15]. Ganze Branchen werden durch diese Break-Through-Innovationen revolutioniert. Typisches Beispiel hierfür ist der Siegeszug der digitalen Fotografie. Innerhalb von weniger als 10 Jahren setzte sich bis 2008 die digitale Kamera mit nahezu 100% Marktanteil durch. Unternehmen wie Kodak, Agfa oder Leica verschwanden nahezu vollständig von der Bildfläche [16].

Ein weiteres modernes Beispiel ist der Siegeszug des Unternehmens Apple gegenüber dem damals marktführenden Unternehmen Nokia. Die Mischung aus intelligenter Technologie (Cyber Physical System), ansprechendem Design und hervorragendem Marketing gepaart mit einem unschlagbaren Geschäftsmodell, dem „nahtlose Informationserlebnis“, haben in nur kurzer Zeit dazu geführt, das Nokia vom Markt verschwand. [17]

Eine ganz neue disruptive Situation entsteht zur Zeit im Automobilmarkt. Neue Unternehmen wie Tesla oder Quereinsteiger wie Apple oder Google und nicht die etablierten Namen der Branche, sorgen immer wieder für neue Schlagzeilen. Sicherlich ist die Produktion und die operative Exzellenz nicht zu unterschätzen, jedoch am Ende ausschlaggebend ist das innovative Wertangebot verpackt im richtigen Geschäftsmodell. Von einer Break-Through-Innovation könnten wir dann reden, wenn es einem der beteiligten Unternehmen gelingt, Schlüsselfaktoren seines Geschäftes signifikant gegenüber seiner Branche zu verschieben. Durch diese Einzigartigkeit der Position aus Kundensicht entsteht die Strategie mit dem angestrebten Wettbewerbsvorteil.

Was also entscheidend ist für die Einordnung des Begriffes Industrie 4.0 im Umfeld der Produktion, ist die Unterscheidung dieser zwei Fälle. Erstens: Mein Wertangebot unterliegt keiner disruptiven Situation: Industrie 4.0 verhält sich für mein Unternehmen evolutionär und ist eine konsequente Weiterentwicklung der variantenreichen, kundenorientierten Produktion mit Hilfe der Lean Ansätze. Zweitens: Mein Wertangebot, z.B. Produkt welches direkt im Produktionsumfeld eingesetzt werden kann, befindet sich in einer spürbaren disruptiven Situation: Industrie 4.0 kann sich für mein Produkt oder mein Geschäftsmodell revolutionär auswirken. Wichtigste Frage in dieser Situation: Was passiert, wenn mein Wettbewerber statt der herkömmlichen Technologie eine intelligente Technologie (Cyber Physical System) einsetzen würde? Welche Schlüsselfaktoren ändern sich? Wie würde dann sein Geschäftsmodell aussehen? Welche Vorteile besitzt er dann aus Kundensicht? [18]

## Literatur:

- [1] Niels Pfläging: „Organisation für Komplexität: Wie Arbeit wieder lebendig wird – und Höchstleistung entsteht“, Redline Verlag 2014, ISBN-10: 3868815708
- [2] Acatech: „Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0 – Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0“, April 2013 (Link: [https://www.bmbf.de/files/Umsetzungsempfehlungen\\_Industrie40.pdf](https://www.bmbf.de/files/Umsetzungsempfehlungen_Industrie40.pdf))
- [3] The Economist: „Does Deutschland do digital?“, 21.11.15 (Link: <http://www.economist.com/news/business/21678774-europes-biggest-economy-rightly-worried-digitisation-threat-ist-industrial>)
- [4] Studie „Zukunftsbild Industrie 4.0“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung von 2012 (Version Okt. 2013)
- [5] Dieter Balkhausen: „Die dritte industrielle Revolution. Wie die Mikroelektronik unser Leben verändert“ 1978, ISBN-10: 3430111471
- [6] Internetartikel der Bundeszentrale für politische Bildung: „Die Internet-Revolution“, 10.10.2008 (Link: <http://www.bpb.de/internationales/amerika/usa/10712/internet>)
- [7] Womack, James P.; Jones, Daniel T.; Roos, Daniel: „Die zweite Revolution in der Automobilindustrie“; Campus 1992, ISBN-10: 359335120X
- [8] Ohno, Taiichi: „Das Toyota Produktionssystem“; Campus 1993, ISBN-10: 3593399296
- [9] Khodawandi, Darius: „Wettbewerbsfähige Prozesse am Beispiel des Porsche Produktionssystems sowie dessen Übertragung auf die Software-Entwicklung“, Präsentation der Porsche-Consulting 2011
- [10] Spiegel: „Die dritte Revolution in der Automobilindustrie“, 1997 (Link: <http://magazin.spiegel.de/EpubDelivery/spiegel/pdf/8778339>)
- [11] Womack, James P.; Jones, Daniel T.: „Lean Thinking: Ballast abwerfen, Unternehmensgewinn steigern“; Campus 2004, ISBN-10: 3593398435
- [12] Wohland, Gehard; Wiemeyer, Matthias: „Denkwerkzeuge für Höchstleister: Wie dynamikrobuste Unternehmen Marktdruck erzeugen“, Murmann Verlag 2007, ISBN-10: 3867740208
- [13] Löhner, Matthias: „Führung neu denken: Das Drei-Stufen-Konzept für erfolgreiche Manager und Unternehmen“, Campus 2005, ISBN-10: 359337787X
- [14] Laloux, Frederic: „Reinventing Organizations: Ein Leitfaden zur Gestaltung sinnstiftender Formen der Zusammenarbeit“, Vahlen Verlag 2015, ISBN-10: 3800649136

- [15] Michael E. Porter: „Was ist Strategie?“, Harvard Business Manager 2/2012
- [16] Clayton M. Christensen, Kurt Matzler, Stephan Friedrich von den Eichen: The Innovators Dilemma: Warum etablierte Unternehmen den Wettbewerb um bahnbrechende Innovationen verlieren, Vahlen Verlag 1997, ISBN-10: 380063791X
- [17] Alexander Osterwalder, Yves Pigneur: „Business Model Generation: Ein Handbuch für Visionäre, Spielveränderer und Herausforderer“, Campus-Verlag 2011, ISBN-10: 359339474X
- [18] Porter, Michael E.; Heppelmann, James E.: „Wie smarte Produkte Unternehmen verändern“, Harvard Business Manager 12/2014 und 12/2015



# Verarbeitung von Thermoplasten mit Langfasern und Endlosfasern

Prof. Dr.-Ing. **C. Bonten**, M.Eng. **T. Koslowski**,  
Institut für Kunststofftechnik, Universität Stuttgart

## Kurzfassung

Das Institut für Kunststofftechnik (IKT) wurde Anfang der 1960er Jahre gegründet und ist aus dem Institut für Kunststofftechnologie und dem Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde (IKP) hervorgegangen. Das neue IKT arbeitet in Lehre, Forschung und industrieller Dienstleistung auf allen Hauptbereichen der Kunststofftechnik: der Werkstofftechnik, der Verarbeitungstechnik wie auch in der Konstruktion/Produktentwicklung.

Hochfeste und -steife Fasern helfen Kunststoffen zu den metallischen Werkstoffen in ihren mechanischen Eigenschaften aufzuschließen, ohne den Gewichtsvorteil vollständig preiszugeben. Je länger die Fasern im Faserkunststoffverbund, je besser die Matrixanbindung und je stärker die Faser in Belastungsrichtung ausgerichtet, desto effektiver können Fasern wirken. Leider gilt jedoch auch: je länger die Fasern, desto schwieriger die Verarbeitung. Lediglich kurzglasfaserverstärkte Compounds können nahezu so einfach wie unverstärkte Kunststoffe verarbeitet werden, sind aber wegen der kurzen Fasern weit weniger effektiv.

Das Institut für Kunststofftechnik arbeitet nicht ausschließlich mit der deutschen Automobilindustrie zusammen, wird von dieser jedoch sicherlich in seinen Leichtbauprojekten stark geprägt und ist entsprechend oft zur Geheimhaltung verpflichtet. Der Beitrag des IKT zu dieser Veranstaltung stellt folgende Themen näher vor:

- Stärkung von Bindenähten faserverstärkter Spritzgießbauteile,
- Einfluss der Bauteilkomplexität auf die Faserschädigung während des Spritzgießens,
- Recycelte Kohlenstofffasern in Hybridgarnen für gestickte Faserhalbzeuge,
- Endlosfasern in Spritzgießbauteilen durch In-situ-Pultrusion von Polyamid,
- CFK-Organobleche vor dem Umspritzen mit Strom gleichmäßig erwärmen.

## Einleitung

Das Institut für Kunststofftechnik (IKT) wurde Anfang der 1960er Jahre gegründet und ist aus dem Institut für Kunststofftechnologie und dem Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde (IKP) hervorgegangen. Das neue IKT arbeitet in Lehre, Forschung und industrieller Dienstleistung auf allen Hauptbereichen der Kunststofftechnik: der Werkstofftechnik, der Verarbeitungstechnik wie auch in der Konstruktion/Produktentwicklung (Bild 1).



Bild 1: Schematische und simulierte Faserorientierung

Hochfeste und -steife Fasern helfen Kunststoffen zu den metallischen Werkstoffen in ihren mechanischen Eigenschaften aufzuschließen, ohne den Gewichtsvorteil vollständig preiszugeben. Je länger die Fasern im Faserkunststoffverbund, je besser die Matrixanbindung und je stärker die Faser in Belastungsrichtung ausgerichtet, desto effektiver können Fasern wirken. Leider gilt jedoch auch: je länger die Fasern, desto schwieriger die Verarbeitung (Bild 2). Lediglich kurzglasfaserverstärkte Compounds können nahezu so einfach wie unverstärkte Kunststoffe verarbeitet werden, sind aber wegen der kurzen Fasern weit weniger effektiv. Höhere mechanische Eigenschaften werden mit Langfasern oder Fasermatten erzielt. Die höchsten mechanischen Eigenschaften entstehen bei Endlosfaserverstärkungen.

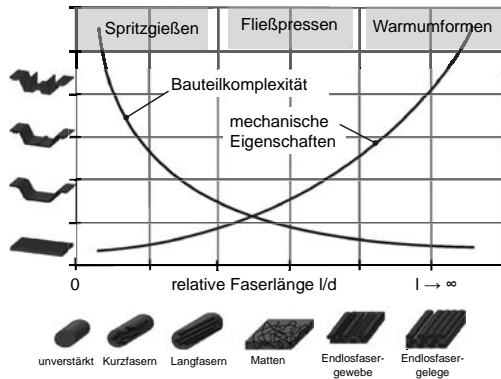


Bild 2: Schematische und simulierte Faserorientierung

### Stärkung von Bindenähten faserverstärkter Spritzgießbauteile

Binde- und Fließnähte bilden bei spritzgegossenen, fasergefüllten Kunststoffen nicht nur einen ästhetischen Mangel, sondern auch eine ausgeprägte mechanische Schwachstelle. Es gibt weder bei der Bindenaht, noch bei der Fließnaht eine Geschwindigkeitskomponente und somit eine Faserdurchdringung über die Grenzfläche hinweg, so dass dort maximal die mechanischen Eigenschaften des ungefüllten Grundwerkstoffes wirken. Bild 3 zeigt schematisch die Schmelzebewegung (oben) und die ungünstige Faserorientierung (unten) einer spritzgegossenen Bindenaht.

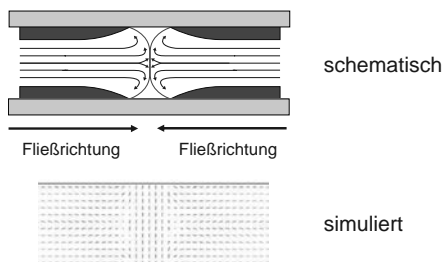


Bild 3: Schematische und simulierte Faserorientierung einer spritzgegossenen Bindenaht

Das Verhältnis der Zugfestigkeit der Bindenaht zu der Zugfestigkeit des verstärkten Kunststoffes wird mit zunehmendem Faseranteil immer ungünstiger: bereits bei 10 M.-% Glasfa-

sen liegt die Zugfestigkeit in der Bindaht lediglich bei 70 % vom verstärkten Kunststoff, bei 30 M.-% Glasfasern schon unter 50 % und bei 50 M.-% etwa bei 33 %.

In der Vergangenheit wurden unterschiedliche Ansätze zur Steigerung der Bindahtfestigkeit verfolgt, wie beispielsweise das Gegentakt-Spritzgießen, für das eine aufwendige Maschinen- oder Werkzeugtechnik erforderlich ist. Am IKT wird an einem neuen, wesentlich unkomplizierteren Ansatz zur Steigerung der Bindahtfestigkeit geforscht:

Mit Hilfe einer handelsüblichen Simulationssoftware kann die Bindaht-Position im Bauteil sehr genau vorhergesagt werden. An dieser Stelle wird nun ein beweglicher Stempel im Werkzeug vorgesehen, welcher z. B. über eine Kernzugsteuerung betätigt wird (Bild 4; oben).

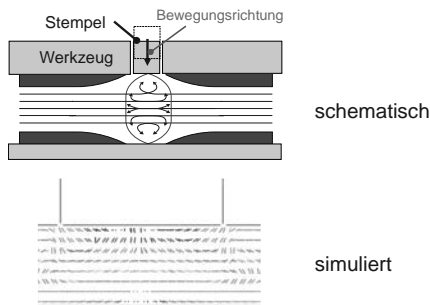


Bild 4: Schematische und simulierte Faserorientierung in der Bindaht bei dem neuen Ansatz

Während der Formfüllung ist der Stempel in der hinteren Position und die Kunststoffschmelze füllt die dorthin erweiterte Kavität. Unmittelbar im Anschluss, noch vor dem Einfrieren der Kunststoffschmelze, fährt der Stempel zügig in seine vordere Position, verringert dadurch lokal das Kavitätsvolumen und mischt die Schmelze und Fasern im Bindahtbereich (Bild 4; unten). Dieses Zurückdrücken unterstützt den Nachdruck und der Spritzgießzyklus kann wie gewohnt fortgesetzt werden.

Ein Werkzeug mit solch einem Stempel erlaubt die Herstellung von technischen Teilen aus faserverstärkten Kunststoffen mit weit verbesserten Bindahteigenschaften auch auf einer konventionellen Spritzgießmaschine. Dieses System kann ebenfalls bei bestehenden Werkzeugen nachgerüstet werden.



## Einfluss der Bauteilkomplexität auf die Faserschädigung während des Spritzgießens

Erst die Kenntnis über die lokale Faserorientierung, -konzentration und Faserlängenverteilung ermöglicht die exakte Vorhersage der mechanischen Eigenschaften von spritzgegossenen, langfaserverstärkten Bauteilen. So kann die Faserorientierung bereits recht gut berechnet werden, allerdings werden der Faserbruch während der Verarbeitung und zusätzlich unterschiedliche Konzentrationen schon gebrochener Fasern im Bauteil nicht hinreichend vorhergesagt. Gerade bei komplexen Bauteilgeometrien erfährt die Schmelze mehrere Belastungsarten, welche die Fasern in der Schmelze zerbrechen bzw. verkürzen. Unterschieden werden dabei die Faser-Faser-, Faser-Wand- und Faser-Matrix-Interaktion.

Am Institut für Kunststofftechnik (IKT) wird umfassend an dieser Themenstellung geforscht. Es finden umfangreiche Untersuchungen von kurz- und langfaserverstärkten Kunststoffen statt, mit dem Ziel der besseren Vorhersagbarkeit und Berechenbarkeit des Werkstoffverhaltens. Für die Versuche wurden zum einen konventionell erhältliche fasergefüllte Kunststoffe, aber auch eigens hergestellte Compounds mit Endlosfasern, die auf einem Spritzgießcompounder dem Kunststoff zugeführt wurden, verwendet. An Versuchsbauteilen, die die Variation von Fließspalthöhen an Wanddickensprüngen und starke Umlenkungen der Schmelze ermöglichen (siehe Bild 5), werden die lokale Faserkonzentration und -länge analysiert.

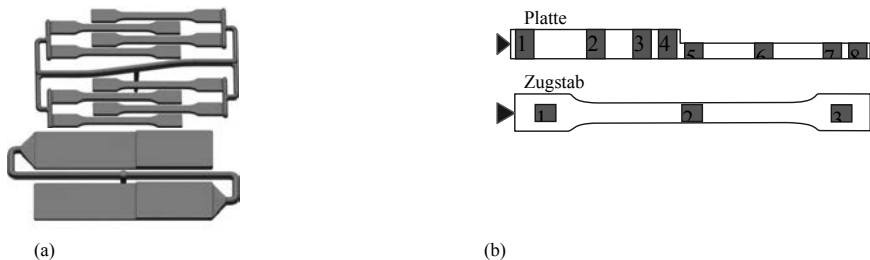


Bild 5: Untersuchte Bauteilgeometrien Zugstab und Platte (a), lokale Messstellen zur Analyse der Faserlängen im spritzgegossenen Kunststoffbauteil (b)

Bild 6 zeigt die vorhergesagten und gemessenen E-Moduln einer Zugstabgeometrie, die mit unterschiedlichen Faserkonzentrationen hergestellt wurden. Ebenfalls ist der Einfluss eines Wanddickensprunges dargestellt, wie ihn die Schmelze beispielsweise in einem komplexen technischen Bauteil erleiden könnte. Lokale Schergeschwindigkeitsänderungen haben dabei die durchschnittliche Faserlänge stark verkürzt und damit die Festigkeit und die Steifigkeit verringert.

Es konnte eine sehr gute Grundlage zur Berechnung der mechanischen Eigenschaften von faserverstärkten, spritzgegossenen Bauteilen erarbeitet werden. Die Untersuchungen zeigen, dass die am IKT vorhergesagten Faserlängen aufgrund der durchgeführten Anpassungen der Simulationsrechnung zur Berechnung der Steifigkeit nun im Mittel zu 90 % mit den Messergebnissen übereinstimmen.

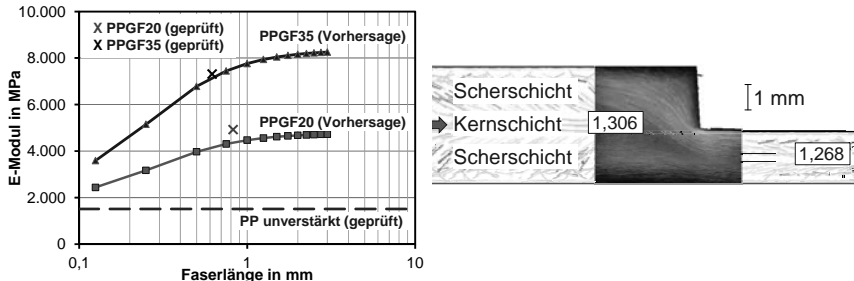


Bild 6: Vorhersage der Steifigkeit in Abhängigkeit von der Faserlänge (links), resultierende Faserlängen im spritzgegossenen Kunststoffbauteil (rechts)

## Endlosfasern in Spritzgießbauteilen durch In-situ-Pultrusion von Polyamid

Die Verwendung von Thermoplasten als Matrixwerkstoff wird von Automobilherstellern wegen deren Vorteile gewünscht, wie etwa der höheren Schlagzähigkeit, besserer Schweißbarkeit und einfachem Recycling. Polyamid ist meist der Werkstoff der Wahl, da es auch höhere Temperaturen mit recht guter Medienbeständigkeit kombiniert.

Für besonders hohe Festigkeiten und Steifigkeiten werden zudem möglichst lange, im besten Falle endlose Verstärkungsfasern benötigt. Leider verbietet die höchst effiziente Spritzgießverarbeitung eine unbeschädigte Einbringung von Fasern, da die Schmelze durch Düse, Anguss und komplexes Werkzeug stark geschert wird und zu lange Fasern dabei brechen. Somit scheint die komplexe Formgebungsvielfalt des Spritzgießens eine lokal hohe Endlosfaserverstärkung in einem Fertigungsschritt auszuschließen; es muss sequentiell vorgegangen werden.

Benötigt man einen sehr hohen Massenanteil an Fasern, werden Endlosfasern meist mit duromeren Matrixsystemen verwendet, zum einen weil deren Monomere günstig sind und zum anderen weil diese viel dünnflüssiger sind und mit geringem Druck eine gute Durchtränkung bis hin zur Einzelfaser ermöglichen. Um diesen Vorteil auch zur Langfaserverstärkung

von Thermoplasten zu nutzen, wird immer häufiger mit dem Polyamid-Monomer Caprolactam gearbeitet. Der Begriff „In-situ-Polymerisation“ hat sich dafür etabliert, obwohl die Reaktion von Monomeren speziell bei Duomeren schon immer „in situ“, also direkt im Werkzeug, abläuft.

Somit wird also das dünnflüssige Monomer Caprolactam unter Zugabe eines Aktivators und eines Katalysators verwendet, welches während der Formgebung zu Polyamid 6 (PA6) polymerisiert. Eine Möglichkeit, mit PA-Monomeren zu arbeiten, ist auch das In-situ-Spritzgießen. Dabei finden die Imprägnierung der Fasern sowie die Reaktion zu fertigem PA6 im Spritzgießwerkzeug statt. Das IKT forscht an der Idee, hochfeste und hochsteife langfaserverstärkte Thermoplasteinleger mittels In-situ-Pultrusion zu fertigen, um diese nachfolgend als lokale Verstärkung ins Spritzgießwerkzeug zu legen und mit kurzglasfasergefülltem Polyamid zu umspritzen.

Auf einer umgebauten RIM-Anlage des IKT (Bild 7, links) konnten erfolgreich uniaxiale, endlosfaserverstärkte Profile aus PA6 hergestellt werden (Bild 7, rechts). Der extreme Fasergehalt von über 70 Masseprozent – auch bei großen Wanddicken und langen Fließwegen – ist möglich, weil das niedrigviskose Monomer die Faserbündel leicht durchtränken kann.

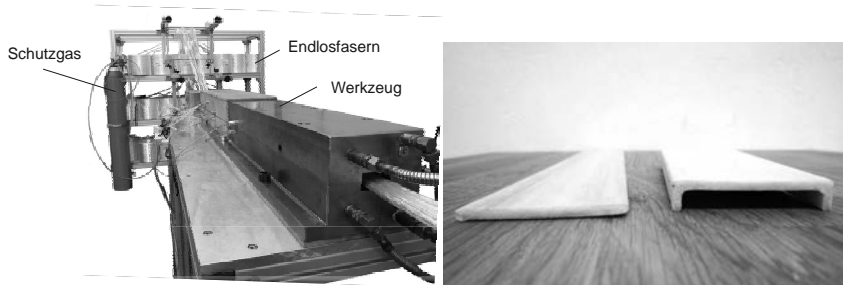


Bild 7: In-situ-Pultrusionsanlage des IKT (links) und in-situ-pultrudierte Profile (rechts)

Im Gegensatz zu den Duomeren können die Fasern aber nicht durch ein Caprolactam-Bad gezogen und getränkt werden, weil die Umgebungsfeuchte die Reaktion zum PA6 verhindert. Die Durchtränkung der Fasern und die Reaktion zum Kunststoff müssen unter Schutzatmosphäre stattfinden.

Die langfaserverstärkten, pultrudierten Profile zeigen höchste Festigkeits- und Steifigkeitswerte. Sie werden danach in ein Spritzgießwerkzeug überführt, mit PA6GF30 umspritzt und so in komplexe Bauteile integriert. Ein Beispiel zeigt der Stuttgarter Biegeträger (Bild 8). Bei ihm sorgen die hochverstärkten Profile in den Randfasern für extreme Biegefestigkeit und

Biegesteifigkeit, während die umspritzte kurzglasfaserverstärkte Formmasse für die komplexe, knickfreie Geometrie verantwortlich ist. So erreicht man, wie beim üblichen Spritzgießen, kurze Zykluszeiten, hervorragende mechanische Bauteileigenschaften, hohe Bauteilkomplexität und gute Recyclingfähigkeit.

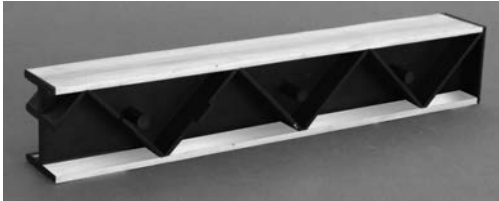


Bild 8: Ein umspritztes in-situ-pultrudiertes Profil aus hochgefülltem Polyamid bildet die Randfasern des höchststeifen IKT-Trägers aus PA6GF30

### **Recycelte Kohlenstofffasern in Hybridgarnen für gestickte Faserhalbzeuge**

Der große Vorteil der Wiederverwendung und des Recycling von faserverstärkten Thermoplasten wird von der Automobilindustrie genannt, doch lediglich geringfügig genutzt. Heutzutage werden in der Industrie nicht verwendbare Kunststoffbauteile (Off-spec) sowie das Angussssystem gemahlen und als Rezyklat dem Spritzgießprozess wieder zugeführt. Die mehrfache Verarbeitung des faserverstärkten Kunststoffes führt meist zur Faserverkürzung. Daher liegen bei faserverstärkten Kunststoffrezyklat meist kürzere Faserlängen vor als bei Neuware, welche schlechtere mechanische Eigenschaften bewirken.

Eine Verbesserung verspricht die Verwendung des hochwertigen Kohlenstofffaser-Abfalls bei der neuen Herstellung von Faserkunststoffverbundbauteilen. Diese kurzen Fasern werden bisher beispielsweise durch Pyrolyse aus einem bestehenden Bauteil gelöst und stehen als Stapelfasern mit einer Länge von immerhin bis zu mehreren Zentimetern zur Verfügung. Die derzeit übliche Wiederverwendung der Fasern ist die Zugabe als Kurzfasern zur Verstärkung des Kunststoffrezyklats. Aus Kostengründen ist dies auf jeden Fall sinnvoll, schöpft jedoch nicht das volle Potenzial der Recyclingfasern aus, da diese während des Verarbeitungsprozesses noch weiter gekürzt werden und im fertigen Bauteil nur noch ein Bruchteil ihrer Ausgangslänge aufweisen.

In einem neuen Ansatz forscht das IKT gemeinsam mit weiteren Instituten der Universität Stuttgart an einer Lösung, bereits verwendete Kohlenstofffasern neu aufzubereiten und als quasi-endlose Rovings und Halbzeuge wiederzuverwenden. Dazu werden die Schnittfasern

zusammen mit recyceltem Polyamid zu Hybridgarn versponnen. Die Stapelfasern werden dabei nicht gekürzt und liegen als quasi-endloses Garn vor.

Nachfolgend werden die Fasergarne unmittelbar dem recycelten Polyamid im Spritzgießcompoundierprozess über den Faserdirekteinzug im Doppelschneckenextruder beigemischt. Hieraus entsteht eine langfaserverstärkte Kunststoffmatrix, welche wesentlich höhere mechanische Eigenschaften aufweist als die konventionell-recycelte Type.

Des Weiteren wird aus dem Hybridgarn im Tailored Fiber Placement (TFP) ein Vorformling gestickt. Das TFP erlaubt die verschnittarme und lastpfadgerechte Ablage der Fasern. Der fertige Vorformling wird im Anschluss zusätzlich dem Spritzgießcompoundierprozess zugeführt. Durch die Verwendung von Hybridgarnen erfolgt eine gute Durchtränkung der Fasern. Der Vorformling wird automatisiert erwärmt, ins Spritzgießwerkzeug eingelegt und durch die Schließbewegung des Werkzeugs konsolidiert, umgeformt und anschließend hinterspritzt.

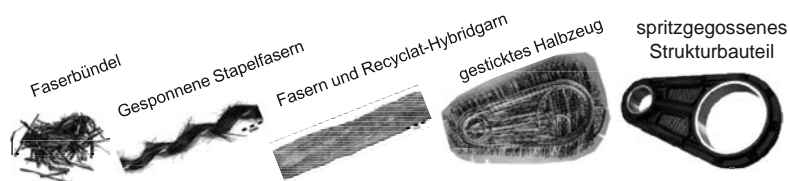


Bild 9: Schritte zur Herstellung von Strukturbauteilen aus Recyclat

Durch die Verwendung von Recyclingfasern und Recyclingkunststoff wird somit ein spritzgegossenes Bauteil generiert, das lediglich sehr geringe Einbußen in Hinblick auf die mechanischen Eigenschaften erfährt und somit ebenfalls für Hochleistungsanforderungen eingesetzt werden kann.

### **CFK-Organobleche und -Tapes vor dem Umspritzen mit Strom gleichmäßig erwärmen**

Ein inzwischen etabliertes Verfahren zur Herstellung von faserverstärkten Hochleistungsbau- teilen ist das Hinterspritzen von Endlosfasergeweben (sog. Organobleche) und Gelegen (sog. Tapes). Hierbei werden plattenförmige Endlosfaserverbundhalbzeuge mit einer thermoplastischen Matrix erwärmt und nachfolgend findet die Formgebung durch einen Umformprozess statt. Eine Kombination des Warmumform- mit dem Spritzgießprozess ist ebenfalls möglich.

Bislang werden zur Erwärmung der Halbzeuge überwiegend Infrarotstrahler (IR-Strahler) verwendet. Das Aufschmelzen der thermoplastischen Matrix erfolgt über eine äußere Strahlungswärme und der Wärmeeintrag in den Kernbereich findet zeitaufwendig mittels Wärmeleitung statt. Dieses indirekte Aufheizverfahren benötigt einen hohen Energieaufwand; der Wirkungsgrad liegt meist unter 40 %. Die maximal erzielbaren Heizraten betragen lediglich bis 10 K/s.

Eine effiziente Alternative hierzu bietet die neu am IKT erforschte Widerstandserwärmung (In-situ-Aufheizverfahren; siehe Bild 10). Die Widerstandserwärmung kann ohne Weiteres in ein Roboterhandlingsystem integriert werden und die Prozesssteuerung vollautomatisiert erfolgen. Im Vergleich zu den konventionellen Aufheizverfahren kann somit das Halbzeug aufgenommen und während der Transportbewegung zum Formgebungswerkzeug erwärmt werden. Auf einen zusätzlichen Prozessschritt, die Erwärmung, kann verzichtet werden.

#### IR-Strahler Heizverfahren



#### Widerstandserwärmung (In-situ-Aufheizung)



Bild 10: Konventioneller und weiterentwickelter Prozessablauf zur Herstellung von Strukturbauteilen

Die Widerstandserwärmung nutzt elektrisch leitende Füll- oder Verstärkungsstoffe, wie z. B. Kohlenstofffasern, zur Erwärmung der Halbzeuge (Bild 11). Dabei wird das Halbzeug an den Enden mit elektrisch leitenden Elektroden kontaktiert und einer elektrischen Spannung ausgesetzt. Aufgrund der Ohm'schen Verluste in den Kohlenstofffasern wird Wärme freigesetzt. Die umgebene Kunststoffmatrix schmilzt unmittelbar auf.

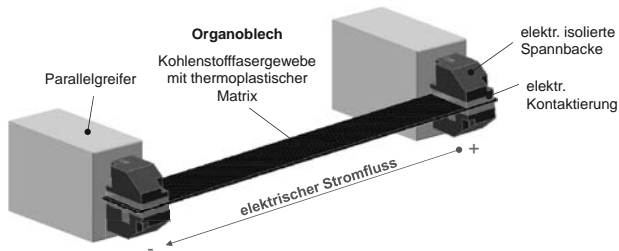


Bild 11: Schematische Darstellung der Widerstandserwärmung

Der thermoplastische Matrixwerkstoff kann prinzipiell beliebig gewählt werden, jedoch haben wir die Versuche mit Blick auf die Automobilindustrie mit Polyamid durchgeführt. Eine Erhöhung der Spannung vergrößert den Widerstand des Halbzeuges und beschleunigt den Aufheizprozess. Dank einer Weiterentwicklung des Verfahrens konnte erstmals am IKT gezeigt werden, dass bei einer Aufheizzeit von 3–5 Sekunden bis zur Umformtemperatur (PA6.6: 290 °C) die mechanischen Eigenschaften bis zu 98 % vom Ausgangswert betragen. Dadurch bietet die Widerstandserwärmung eine vielversprechende Möglichkeit, endlosfaser-verstärkte Thermoplaste energieeffizient und schnell zu erwärmen.

Zudem wurde am IKT ein Thermoplast-Imprägnier-Prozess aufgebaut, mit dem eine Kleinserienproduktion von unidirektional verstärkten Glasfaser- oder Kohlenstofffaser-Tapes möglich ist. Die einzelnen Rovings werden von der Rolle abgewickelt, eng nebeneinander zusammengeführt und einem Imprägnierwerkzeug zugeführt (Bild 12).

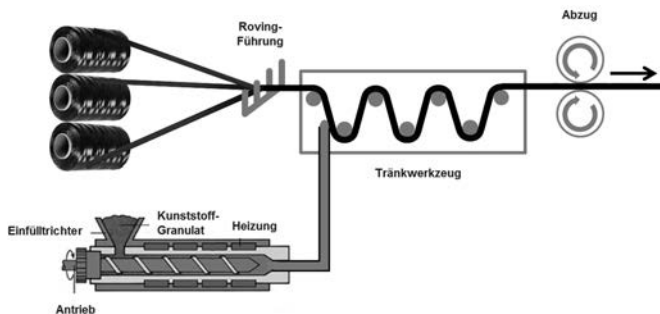


Bild 12: Schematische Darstellung des Thermoplast-Imprägnier-Prozesses

Bei manchen Faser- oder Matrixtypen ist eine Vorheizung der Fasern mit Heißluft oder IR-Strahlern zwischengekoppelt. Durch die sehr geringe Dicke ist es möglich, handelsübliche, Polyamide zu verwenden, es muss also nicht zwangsläufig mit Caprolactam gearbeitet werden. Die Polyamide werden mit einem Einschneckenextruder aufgeschmolzen und in das Werkzeug gefördert. Die sogenannte Schmelzeimprägnierung der Fasern findet anschließend im Werkzeug mit Hilfe von Umlenkelementen statt. Nachfolgend wird das Tape über einen Bandabzug weitergefördert und aufgerollt.

Prinzipiell erfolgt der kontinuierliche Prozess ähnlich dem der In-situ-Pultrusion. Lediglich die geringe Wanddicke der Tapes erlaubt die Imprägnierung der Fasern mit dem bereits polymerisierten Kunststoff, welcher im Vergleich zu Caprolactam eine wesentlich höhere Viskosität aufweist. Der große Vorteil des Thermoplast-Imprägnier-Prozesses zur Herstellung von Tapes ist, dass die thermoplastische Kunststoffmatrix variabel gewählt werden kann. So können Tapes aus beispielsweise Polyamid oder Polypropylen mit unterschiedlichen Fasern problemlos kostengünstig hergestellt werden.



# **Spritzgießdirektcompoundierung (SGDC) – Produktspezifische Materialentwicklung im Spritzgießprozess**

Prof. Dr.-Ing. **E. Moritzer**, **Y. Martin**, M.Sc.,  
Universität Paderborn, Kunststofftechnik Paderborn (KTP);  
Dr.-Ing. **E. Müller**, Behr-Hella Thermocontrol GmbH, Vorentwicklung  
Mechatronik & HMI, Lippstadt

## **1 Einleitung**

Individuelle Produkte, die in geringen Stückzahlen gefertigt werden und kurze Lebenszyklen aufweisen, gewinnen auch in der Kunststoffindustrie zunehmend an Bedeutung. Um der wachsenden Nachfrage nach kundenspezifischen Systemlösungen gerecht zu werden, bedarf es einer bestmöglichen Abstimmung zwischen den geforderten Eigenschaften eines Produktes und der eingesetzten Materialrezeptur. Die Relevanz von Kunststoffrezepturen, die explizit auf die Anforderungen eines Produktes abgestimmt sind, steigt daher stetig an. Eine produktspezifische Compoundentwicklung ist mit den derzeit auf dem Markt verfügbaren Möglichkeiten jedoch nicht realisierbar, da diese mit einem enormen zeitlichen und finanziellen Aufwand verbunden ist. Gründe hierfür liegen u. a. in der Geschichte der Forschung und Entwicklung großer Rohstoffhersteller. Dort stehen seit den Neunzigerjahren prinzipiell zwei strategische Trends im Vordergrund [SCH99]. Ein Trend betrifft die Verfahrensentwicklung. Hier besteht fortwährend das Ziel, möglichst kostengünstig immer mehr Volumen in kürzester Zeit zu produzieren, um den Bedarf an etablierten Kunststoffen abdecken zu können. Die logische Konsequenz spiegelt sich in der zunehmenden Konsolidierung der Rohstoffbranche wider [STE02b]. Der zweite Trend bezieht sich auf die Rohstoffentwicklung selbst, wo es nicht mehr darum geht, völlig neue Kunststoffarten zu erzeugen, sondern vielmehr darum, Copolymere und Blends zusammenzustellen, um die in der Verfahrensentwicklung erarbeiteten World-Scale-Anlagen auslasten zu können. Dies führt zu einer zunehmenden Standardisierung etablierter Kunststoffe. Den Konstrukteuren steht somit bei der Entwicklung neuer Kunststoffprodukte bezüglich der auf das Produkt abgestimmten Polymerauswahl nur noch ein geringer Spielraum zur Verfügung und die Chance, einen Wettbewerbsvorteil über das eingesetzte Material zu erlangen, ist marginal [SMB07].

Üblicherweise wird in der Kunststofftechnik zwischen Polymerherstellung, -aufbereitung und -verarbeitung differenziert. Diese drei Schritte erfolgen zumeist bei unterschiedlichen Unternehmen. Kunststoffhersteller produzieren Rohpolymere zunächst in großen Chargen. Um die

Materialeigenschaften auf die beträchtliche Anwendungsvielfalt der Kunststoffe anzupassen, werden diese bei einem Compoundeur oder direkt beim Hersteller aufbereitet. Dabei können neben Füll- und Verstärkungsstoffen eine Vielzahl weiterer Additive in den Kunststoff eingearbeitet werden. Abschließend erfolgt die Herstellung von Endprodukten bei einem Kunststoffverarbeiter. Auf Seiten der Verarbeiter ist daher selbst meist nur ein eingeschränktes Wissen über die Bestandteile polymerer Werkstoffrezepturen und dessen expliziten Auswirkungen auf bestimmte Eigenschaften vorhanden [STE02a]. Eine eigene Compoundierung oder die Direktverarbeitung von Kunststoffen wird daher vermieden. Die Auswahl des Werkstoffs orientiert sich i. d. R. an marktgängigen und bekannten Produkten, da insbesondere die Herstellung spezieller und somit kleiner Materialchargen durch einen externen Compoundeur oftmals sehr kostenintensiv ist. Dies führt dazu, dass die Materialeigenschaften nicht in vollem Maße mit den tatsächlichen Anforderungen des Produktes korrespondieren und Kosten- und Qualitätspotenziale ungenutzt bleiben.

Zur Realisierung einer produktspezifischen Materialentwicklung muss der traditionelle Rezepturenentwicklungsprozess vereinfacht und beschleunigt werden. Durch die Spritzgießdirektcompoundierung (SGDC) erfolgt die Integration des Compoundierschrittes in den Spritzgießprozess und somit die Einsparung des zusätzlichen Prozessschrittes der Aufbereitung. Bei Einsatz der SGDC, gekoppelt mit der Erzeugung einer unternehmensinternen Materialentwicklungskompetenz, ist es möglich, Erkenntnisse in der Materialentwicklung direkt in die Produktentwicklung einzubringen und umgekehrt. Dies führt zum einen zu einem Synergieeffekt zwischen zwei bedeutenden Aspekten in der Produktentwicklung – der Konstruktion und der Materialauswahl – und zum anderen zu einem Einsparpotenzial an Materialkosten. Zusätzlich zur Kostenersparnis pro Kilogramm ergibt sich der Vorteil der geringeren thermischen und mechanischen Belastung des Matrixmaterials sowie etwaiger Verstärkungsstoffe durch die Reduktion des Verarbeitungsschrittes, was in vielen Fällen wiederum zu einer Steigerung der mechanischen Performance, aber auch zu einer erschwerten Homogenisierung des Materials führt. Aus der Zusammenlegung des Aufbereitungs- und Formteilbildungsprozesses resultiert zudem eine erhöhte Energieeffizienz bei verbesserter Wirtschaftlichkeit.

## 2 Verfahrensablauf

Um den Compoundierschritt in den Spritzgießprozess zu integrieren, bedarf es spezifischer Zusatzkomponenten. Die eingesetzte Anlagentechnik besteht im Kern aus einer vollelektrischen, holmlosen Spritzgießmaschine der Marke ENGEL (e-motion 200/100). Beschickt wird

die Spritzgießmaschine über vier gravimetrische Dosierdifferentialwaagen der Marke BRABENDER, die eine prozessstabile Dosierung von Granulat, Schnittglas und Additiven, auch in kleinsten Mengen, sicherstellen. Zwischen Dosierung und Spritzgießmaschine erfolgt eine Vormischung, um eine möglichst homogene und gleichbleibende Konzentrationsverteilung der in das Aggregat eingezogenen Materialmischung zu gewährleisten. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit eine statische Mischdüse in den Prozess zu integrieren, um eine weitere Homogenisierung der Schmelze hervorzurufen. Der Spritzgießprozess kann ferner als konventionell bezeichnet werden, wobei über unterschiedliche Schneckenkonzepte Einfluss auf die Scher- und Mischwirkung während der Plastifizierung genommen werden kann. Nach der Fertigstellung der Probekörper werden diese, je nach Produktanforderungen, speziellen Prüfverfahren unterzogen. Hierbei stehen insbesondere mechanische Prüfverfahren sowie die Analyse der vorliegenden Faserstruktur im Vordergrund (Fasergehalt, Faserlänge, Zugversuch und Schlagversuch). Nach einer Auswertung der ermittelten Kennwerte können Rückschlüsse auf die bestehende Rezeptur gezogen und ggf. entsprechende Änderungen vorgenommen werden. Der verfahrenstechnische Ablauf des neuen Konzeptes ist schematisch in Bild 1 dargestellt.

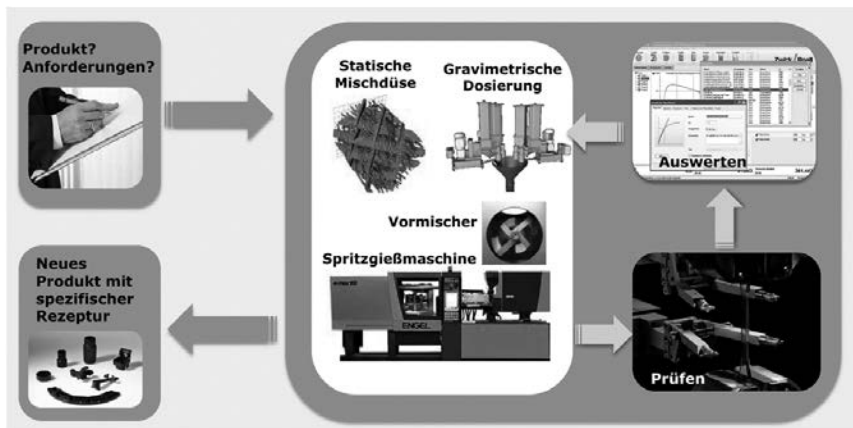


Bild 1: Schematischer Verfahrensablauf der Spritzgießdirektcompounding

### 3 Ausgangsmaterialien

Der Fokus innerhalb der Technologieentwicklung liegt auf der Glasfaserverstärkung von thermoplastischen Basismaterialien.

### 3.1 Matrixmaterial

Das eingesetzte Matrixmaterial bei faserverstärkten Thermoplasten wirkt sich auf die zu erzielenden Eigenschaften des Faserverbundsystems aus. Hierbei kommt den beiden teilkristallinen Thermoplasten PP und PA die derzeit größte Bedeutung als Matrixmaterial für glasfaserverstärkte Verbunde zu [FS07].

PP besticht zum einen durch eine hohe Steifigkeit und Festigkeit bei geringer Dichte, zum anderen weist PP eine sehr gute thermische Stabilität sowie chemische Beständigkeit bei einem vergleichsweise niedrigen Preis auf [OP98]. Unvorteilhaft bei der Versetzung von PP mit Glasfasern ist dagegen die Unpolarität, die eine ausreichende Haftung der Verbundpartner erschwert und die Zugabe spezieller Haftvermittlersysteme sowie definierter Glasfaserschichten voraussetzt [DB90, BRA01].

Für die experimentellen Untersuchungen und die Erzeugung der Rezepturdaten werden insgesamt vier verschiedene PP-Typen des Herstellers SABIC eingesetzt. Diese unterscheiden sich vor allem in ihren Matrixviskositäten bzw. den MFR-Werten (Bild 2).

<b>PP</b>		MVR / MFR*	$\eta_0 (T_M=220^\circ\text{C}) /$ $\eta_{\text{charak}} (T_M=220^\circ\text{C})$	$\sigma_M$	$\epsilon_B$	$a_{c,U} /$ $a_{c,N}^*$	$E_t$	$\rho$
		[cm <sup>3</sup> /10 Min.] / [g/10 Min.]*	[Pa·s]	[MPa]	[%]	[kJ/m <sup>2</sup> ]	[MPa]	[kg/m <sup>3</sup> ]
SABIC	PP 500P	4,91 / (3,1)*	3900 (-)*/4300,86	(41)*	(600)	(-)	1550	900 (905)*
	PP 575P	- / (10,5)*	1000 (-)*/1039,79	(43)*	(600)	(1,5)*	1800	880 (905)*
	PP 578N	- / (25)*	510 (-)*/537,72	(42)*	(500)	(2,1)*	2100	870 (905)*
	PP 579S	62,14 / (47)*	280 (-)*/267,43	36,17 (41)*	8,6 (500)*	70,62 (2,0)*	1378 (1900)*	807 (905)*
A. SCHUL -MAN	Polyfort FPP	53,22 / (-)*	200 (T <sub>M</sub> =240 °C)	36,77 (-)*	8,53 (-)*	91,89 (-)*	1620,3 (-)*	880 (-)*

Bild 2: Eigenschaften der eingesetzten PP-Matrixmaterialien (\*Werte aus dem Datenblatt)

### 3.2 Glasfasern

Für die Verarbeitung im SGDC-Verfahren werden, aufgrund der guten mechanischen Eigenschaften sowie der guten thermischen und chemischen Beständigkeit bei einem geringen Preis, die aus Aluminium-Borosilikaten hergestellten E-Glasfasern eingesetzt [STA98]. Die Schnittglasfaserbündel bestehen dabei i. d. R. aus 150-300 Filamenten pro Bündel, die von einer Schlichte umschlossen sind. Die Schlichte hat dabei zum einen die Aufgabe, während

des Herstellungsprozesses die empfindliche Faser zu schützen und die vorliegende Reibung zu reduzieren, zum anderen sorgt die Schlichte für eine bessere Faser-Matrix-Anbindung und Benetzung der Fasern. Demnach kann über die genaue Zusammensetzung der Schlichte teilweise erheblicher Einfluss auf bestimmte Eigenschaften des Faser-Matrix-Verbundsystems ausgeübt werden.

Die eingesetzten Fasern stammen von der Firma PPG INDUSTRIES FIBER GLASS BV und sind vom Typ HP3299 (Faserausgangslänge: 4,5 mm, Faserdurchmesser: 14 µm).

### **3.3 Additive**

Um die Eigenschaften exakt auf die Anforderungen der jeweiligen Anwendung abstimmen zu können, bedarf es des Einsatzes von Additiven. Diese haben die Aufgabe, das Polymer verarbeitungs- und applikationsgerecht zu modifizieren. Neben der Zugabe eines Dispergiermittels ist bei der SGDC faserverstärkter Thermoplaste für eine ausreichende Faserbündelaufpleißung und möglichst homogenen Verteilung in der umgebenden Matrix, je nach Matrixmaterial, die Versetzung mit geeigneten Haftvermittlern von Bedeutung.

In den vorliegenden Untersuchungen wird ein Haftvermittler eines mit Maleinsäureanhydrid modifizierten PP namens PRIEX 20097 (Propfgehalt 0,45 %) der Firma ADDCOMP HOLLAND BV eingesetzt. Zur Dispergierung der Glasfasern in einer PP-Matrix wird zusätzlich ein pulverförmiges Additiv namens Plastaid-T von der Firma FINE ORGANICS INDUSTRIES PVT. LTD. verwendet.

## **4 Einfluss der eingesetzten Rezepturbestandteile**

Die unterschiedlichen Auswirkungen der eingesetzten Rezepturbestandteile auf die sich ergebenden mechanischen Eigenschaften, die Qualität der Faser-Matrix-Haftung, die Faserlängenverteilung und die Faserbündelaufpleißung sind von essentieller Bedeutung für eine produktspezifische Materialentwicklung faserverstärkter Thermoplaste mittels der SGDC. Im Folgenden wird zum einen auf den Einfluss der gewählten Matrix und zum anderen auf die Auswirkungen der eingesetzten Additivierung eingegangen.

### **4.1 Einfluss der Matrixviskosität**

Um den Einfluss der Viskosität des Matrixmaterials auf die resultierenden Eigenschaften bei der Direktcompoundierung zu untersuchen, wurden vier verschiedene PP-Materialien mit unterschiedlichen MFR-Werten bzw. Viskositäten eingesetzt. Die MFR-Werte variierten dabei zwischen 3,1 g/10 min (Extrusionstyp, hochviskos) und 47 g/10 min (Spritzgießtyp, niedrigviskos). Die Viskositäten im charakteristischen Schergeschwindigkeitsbereich beim

Spritzgießen ( $\gamma = 103 \text{ 1/s}$ ) bewegen sich zwischen 58 Pa s und 105 Pa s (bei  $T_M=220^\circ\text{C}$ ). Alle vier verarbeiteten Kunststoffe liegen in ihren Grundmaterialeigenschaften in einem ähnlichen Eigenschaftsbereich (Bild 2).

Bei der Analyse der Ergebnisse wird deutlich, dass mit steigendem MFR-Wert und damit sinkender Viskosität eine Zunahme der mechanischen Eigenschaften (Zugfestigkeit und Schlagzähigkeit, Bild 3) zu verzeichnen ist.

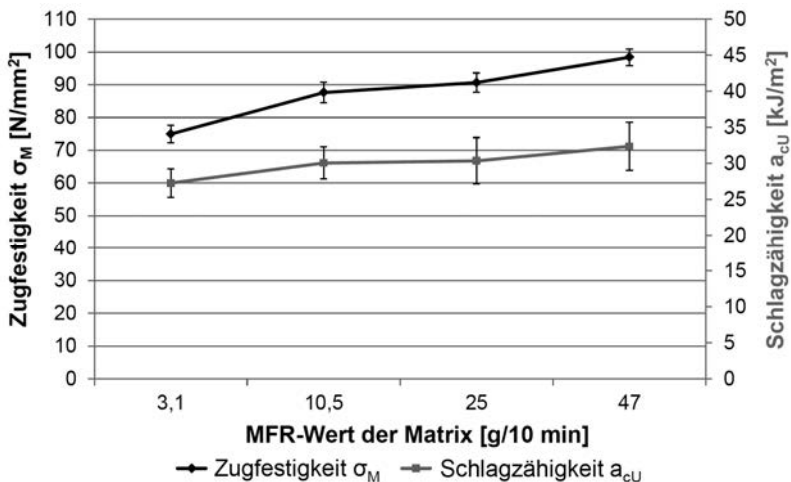


Bild 3: Einfluss des MFR-Wertes auf die mechanischen Eigenschaften  
(Rezeptur: PP GF30 (HP3299), 3 Gew.-% HV, 3 Gew.-% DH)

Der Grund hierfür liegt in einer verbesserten Benetzung und Durchtränkung der Fasern bei sinkender Viskosität, was sich wiederum in einer verbesserten Faser-Matrix-Anbindung widerspiegelt.

## 4.2 Einfluss der Additivierung

Die SGDC-Verarbeitung einer faserverstärkten Thermoplast-Matrix erfordert die Zugabe von speziellen Additiven, um je nach Matrixmaterial eine ausreichende Faser-Matrix-Adhäsion oder Filamentverteilung zu erzielen. Von Bedeutung sind hier haftvermittelnde Substanzen sowie die Dispergierung erleichternde Additive.

Neben der generell bei einer PP-Matrix notwendigen Additivierung mit Hilfe eines Haftvermittlers (HV), ist die Zugabe einer Dispergierhilfe (DH) im SGDC-Prozess erforderlich, um eine ausreichende Bündelaufspaltung zu gewährleisten. Um den Einfluss der beiden Additive bei einer faserverstärkten PP-Matrix zu analysieren, wurde der Gewichtsanteil beider Ad-

ditiv in den Grenzen von 0 Gew.-% bis 3 Gew.-% in einer Schrittweite von 1 Gew.-% variiert. Die Auswirkungen auf die Dispergiertgüte und die sich ergebenden mechanischen Eigenschaften wurden daraufhin in Kombination untersucht. Das Ergebnis zeigt, dass die Zugabe des Dispergierhilfsmittels, separat betrachtet, einen extrem negativen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften ausübt (Abbildung 4-22). Der Grund hierfür ist, dass sich die Dispergierhilfe auf der Faseroberfläche bzw. auf der an die Faser gebundenen Schlichte anlagert und sich der unpolare Anteil des Additivs in die entgegengesetzte Richtung orientiert. Dies führt zum einen zu einem erleichterten Abgleiten der Fasern voneinander und somit zu einer verbesserten Dispergiertgüte, zum anderen aber gleichzeitig zu einer Behinderung der Faser-Matrix-Anbindung durch ein Herabsetzen der haftvermittelnden Wirkung der Faserschlichte. Die alleinige Betrachtung des HVs führt dagegen eindeutig zu einem Anstieg der Zugfestigkeit (Bild 4).

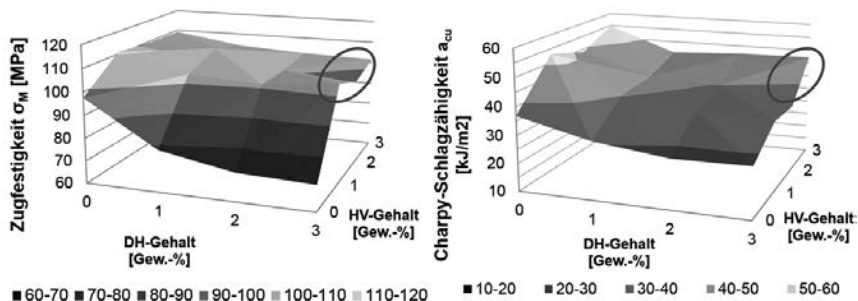


Bild 4: Einfluss der Additivkombination auf die Zugfestigkeit und die Schlagzähigkeit (PP 579S GF 30 (HP3299))

Werden beide Additive in Kombination eingesetzt, führt dies dazu, dass der Haftvermittler die Festigkeitsherabsetzung des Dispergieradditivs in gewissem Maße ausgleichen kann, indem er die für einen guten Verbund notwendige Faser-Matrix-Haftung deutlich verbessert.

Demnach liegt eine gute Additivierung für die Verarbeitung einer glasfaserverstärkten PP-Matrix mit der SGDC bei einer kombinierten Zugabe eines Haftvermittlers und einer Dispergierhilfe vor. Der Anteil des Dispergieradditivs sollte für eine ausreichende Filamentverteilung mindestens 2 Gew.-% betragen, unterhalb dieser Konzentration kommt es zu keiner zufriedenstellenden Faserdispergierung. Die für eine genügende Faser-Matrix-Haftung vorliegende Konzentration des Haftvermittlers beträgt ebenfalls mindestens 2 Gew.-%. Nur so kann eine ausreichende Dispergiertgüte bei gleichzeitig hohen mechanischen Eigenschaften gewährleistet werden (Bild 4).

Um den in den mechanischen Untersuchungen festgestellten Einfluss der Additivierung genauer zu untersuchen, wurden REM-Aufnahmen von den Bruchflächen verschiedenen additiverter Probekörper nach dem Zugversuch angefertigt. Hierbei wurden alle Kombinationsmöglichkeiten mit und ohne 3 Gew.-% Haftvermittler (HV) bzw. Dispergierhilfe (DH) betrachtet. Die Ergebnisse der REM-Aufnahmen korrelieren mit den bei den mechanischen Eigenschaften festgestellten Zusammenhängen und zeigen deutliche Auswirkungen der Additivzugaben auf die Faser-Matrix-Haftung. Ohne Additivzugabe liegt eine schlechte Faser-Matrix-Haftung bei gleichzeitig unzureichender Faserdispergierung vor (Bild 5, erste Zeile). Es sind noch Faseranhäufungen in der Bruchfläche zu sehen (Bild 5, erste Zeile links) und die Matrix zeigt keine deutliche Anbindung an die Fasern (Bild 5, erste Zeile rechts). Die Zugabe des Haftvermittlers verbessert die Faser-Matrix-Haftung enorm, allerdings ist die Separierung und homogene Verteilung der Fasern in der Matrix noch nicht zufriedenstellend, sodass Faserbündelanteile in der Bruchfläche vorzufinden sind (Bild 5, zweite Zeile). Die alleinige Zugabe von 3 Gew.-% der Dispergierhilfe sorgt zwar für eine ausreichend homogene Verteilung der Fasern in der umgebenden Matrix, allerdings ist die Faser-Matrix-Haftung faktisch nicht existent (Bild 5, dritte Zeile). Zudem sind in diesem Fall ein hoher Pull-Out-Anteil und Faserabdrücke vorhanden. Dies korreliert mit den Ergebnissen aus dem Zug- und Schlagversuch, denn die Probekörper mit Zugabe von 3 Gew.-% des Dispergieradditivs weisen die geringste Zugfestigkeit und Schlagzähigkeit auf. Die REM-Aufnahmen bei der kombinierten Additivkombination aus Haftvermittler und Dispergierhilfe zeigen dagegen eine sehr gute Faser-Matrix-Adhäsion bei einer gleichzeitig zufriedenstellenden Dispergierung der Fasern in der umgebenden Matrix, was ebenfalls mit höheren mechanischen Kennwerten einhergeht (Bild 5, vierte Zeile). Die in den mechanischen Untersuchungen festgestellten Additiveinflüsse werden demnach mit den angefertigten REM-Aufnahmen sehr gut visualisiert und erklärt.



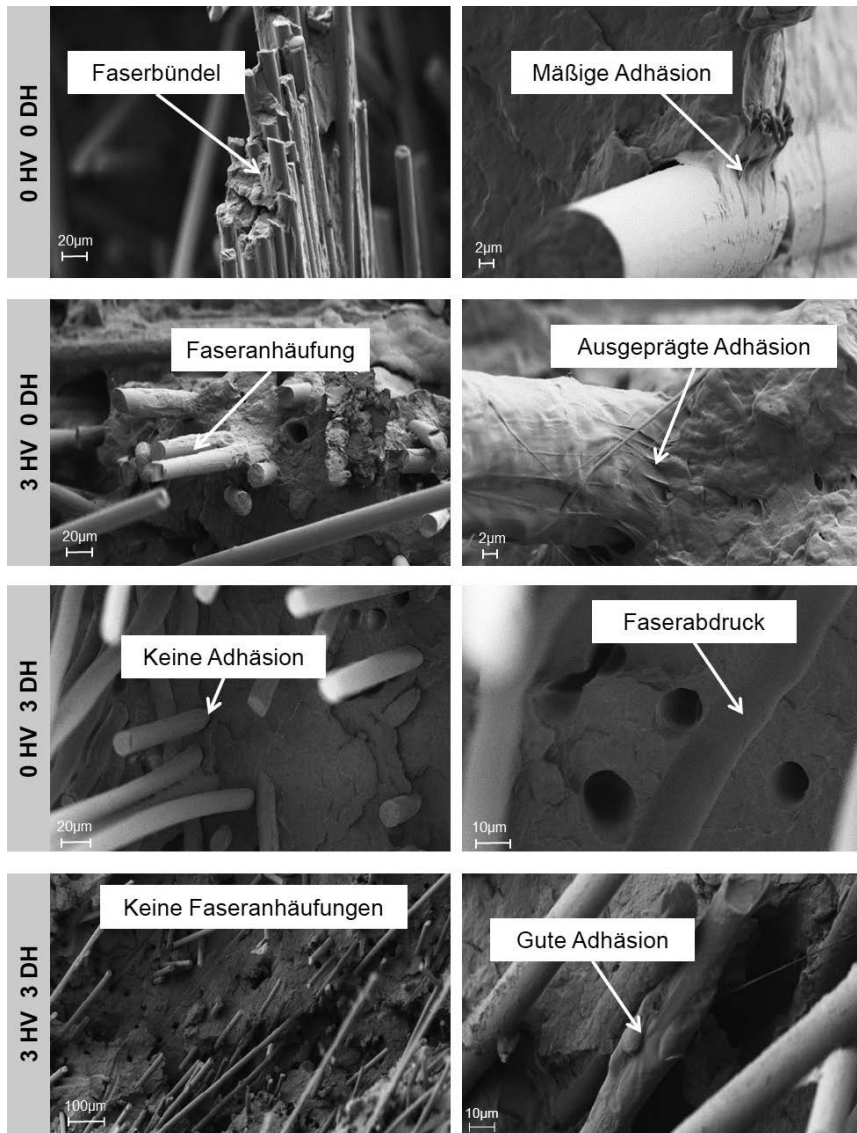


Bild 5: REM-Aufnahme der Bruchflächen der unterschiedlich additivierten Proben (PP GF30 (HP3299), DH: Dispergierhilfe, HV: Haftvermittler)

## 5 Vergleich zur konventionellen Doppelschneckencompoundierung

Um die Güte der Direktcompoundierung beurteilen zu können, wurde die konventionelle Vorgehensweise (Compoundierung auf der Doppelschnecke mit anschließender Spritzgießverarbeitung: DSE und SG) mit der SGDC verglichen. Hierbei wurden die gleichen Rezepturen zum einen auf einem Doppelschnecken-extruder (Typ: ZSK 25, Hersteller: COPERION GMBH) compoundiert und anschließend spritzgegossen und zum anderen auf der Spritzgießmaschine direktcompoundiert. Um aus den hergestellten Compounds untereinander vergleichbare Probekörper zu erhalten, fand die anschließende Verarbeitung auf der schon für die SGDC eingesetzten Spritzgießmaschine der Marke ENGEL (e-motion 200/100) unter konstanten Prozessbedingungen statt.

Bei einem Vergleich der beiden Compoundierkonzepte wird deutlich, dass die mechanische Performance (Zugfestigkeit, Schlagzähigkeit) der Probekörper, die im Spritzgießcompoundierverfahren hergestellt wurden, durchweg (bei allen untersuchten Fasergehalten) über den mechanischen Eigenschaften der Probekörper liegen, die aus dem Material gespritzt wurden, welches auf der Doppelschnecke compoundiert wurde (Bild 6). Hierbei erfolgt bei beiden Compoundierkonzepten der Einsatz der gleichen Rezepturen (PP 579S X\*GF (HP3299) + 3 Gew.-% HV + 3 Gew.-% DH), wobei der Fasergehalt zwischen 20 und 50 Gew.-% variiert wurde. Bei der herkömmlichen Compoundierung auf der Doppelschnecke kann die Einarbeitung von mehr als 40 Gew.-% Glasfasern aufgrund des geringen Schneckendurchmessers ( $D = 25 \text{ mm}$ ) der eingesetzten Doppelschneckenanlage als kritisch eingestuft werden, weshalb für diesen Fasergehalt keine Doppelschneckencompoundierung durchgeführt werden konnte. Der Grund ist ein starkes lokales Abkühlen der Schmelze im Bereich der Faserzuführung über die Seitenbeschickung bei hohen Fasergehalten.

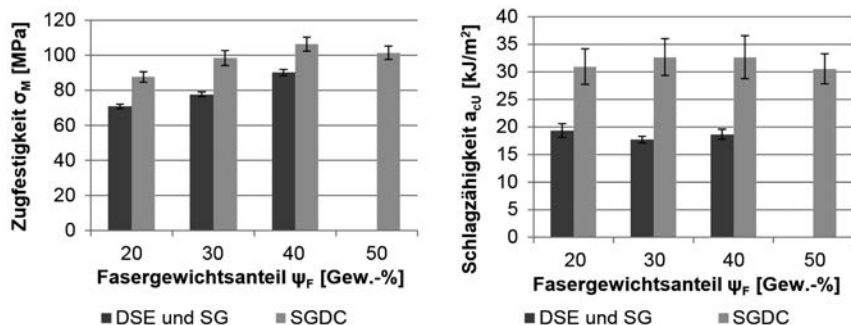


Bild 6: Einfluss der Compoundierkonzepte („DSE und SG“ und „SGDC“) auf die mechanischen Eigenschaften bei unterschiedlichen Fasergewichtsanteilen (Rezeptur: PP 579S + X\*GF (HP3299) + 3HV + 3 DH)

Der Hauptgrund für die deutlich besseren mechanischen Eigenschaften liegt in der Tatsache, dass die erzielten Faserlängen im direktcompoundierten Probekörper teilweise deutlich über den Faserlängen der auf konventionellem Wege gefertigten Probekörper liegen (Bild 7).

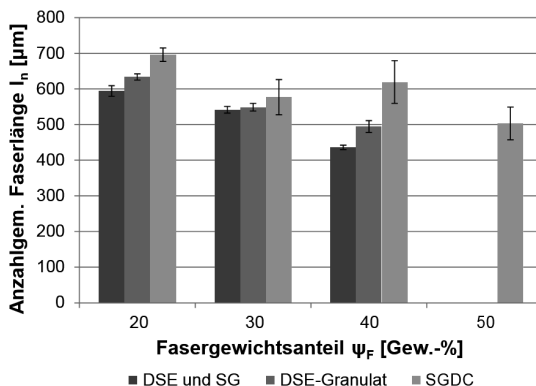


Bild 7: Einfluss der Compoundierkonzepte auf die anzahlgewichtete Faserlänge im Bauteil („DSE und SG“ und „SGDC“) bzw. Granulat (DSE-Granulat) bei unterschiedlichen Fasergewichtsanteilen (Rezeptur: PP 579S + X\*GF (HP3299) + 3HV, 3DH)

Der in die Schmelze eingebrachte Schereintrag ist während des Plastifizierprozesses auf der Spritzgießmaschine deutlich geringer, was zu einer reduzierten Faserlängenabnahme im SGDC-Prozess führt, zumal die Fasern bei der Direktcompoundierung nur einen Prozess-

schritt durchlaufen. Weiterhin wird deutlich, dass das DSE-Granulat im Spritzgießprozess selbst nur noch eine geringfügige Schädigung erfährt, da die Fasern im Kurzfasergrenulat schon eine ausreichend geringe Knicklänge aufweisen.

## 6 Zusammenfassung

Die vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass mit Hilfe des Directcompoundierverfahrens produktspezifische Rezepturen mit einer guten Qualität, teilweise sogar besseren mechanischen Eigenschaften als bei vergleichbaren Referenzmaterialien, erzeugt werden können.

Der positive Einfluss einer geringen Viskosität war auch beim Herabsetzen der Matrixviskosität zu beobachten. Hier liegt der Grund für die steigenden mechanischen Eigenschaften mit zunehmendem MFR der Matrix bzw. abnehmender Viskosität an der Tatsache, dass die einzelne Faser besser eingebettet werden können, da sie von der niedrigviskosen Matrix besser benetzt werden. Weitere Auswirkungen zeigte die vorliegende Additivierung der Faserverbundwerkstoffe. Bei einer PP-Matrix ist die Zugabe eines Haftvermittlers aufgrund der geringen chemischen Ähnlichkeit der Matrix zur Glasfaser unerlässlich, außerdem ist in den meisten Fällen die Zugabe einer Dispergierhilfe notwendig, um eine ausreichende Faserbündelaufspaltung trotz des vergleichsweise geringen Schereintrags bei der SGDC zu gewährleisten.

Durch einen Vergleich zu ausgewählten Referenzmaterialien bei unterschiedlichen Fasergehalten, wurde eine Gegenüberstellung mit der konventionellen Verarbeitung von Kurzfasergrenulaten realisiert. Die mechanischen Kennwerte der direkt-compoundierten Rezepturen liegen über denen der aus konventionellem Kurzfasergrenulat gefertigten Bauteile. Lediglich bei hohen Fasergehalten sind die Werte nahezu auf einem Niveau (PP GF40). Die Einarbeitung von hohen Fasergehalten bei der SGDC ist aufgrund des reduzierten Schereintrags und der damit verbundenen erschwerten Dispergierung sowie Benetzung und Durchtränkung begrenzt, wobei selbst bei hohen Fasergehalten kein drastischer Abfall gegenüber den Referenzmaterialien vorliegt. Allerdings sollte dieser Aspekt bei der Rezepturzusammenstellung beachtet werden.

## Literatur

- [BRA01] BRAST, K.: „Verarbeitung von langfaserverstärkten Thermoplasten im direkten Plastifizier-/Pressverfahren“, Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen
- [DB90] DAEMEN, J.M.H.; BESTEN; J. DEN.: „Einfluss der Glasfaserschlichte auf die Eigenschaften von GF-PP“, Tagungsumdruck zur 23. AVK-Tagung, Mainz 1990, S. 121 ff.
- [FS07] FLEISCHHAUER, M.; SCHÜRMANN, H.: „Maßgeschneiderte Matrixsysteme für FKV“, Kunststoffe, 4/2007, S. 116–119
- [OP98] OEVER, M. VAN DEN; PEIJS, T.: „Continuous-glas-fibre-reinforced polypropylene composites: II. Influence of maleic-anhydride modified polypropylene on fatigue behaviour“, Composites, 29A (1998), S. 227 ff.
- [SCH99] SCHMITT, B.: „Klimawechsel“ Kunststoffe 89 (1999) 6, S. 24–31
- [SMB07] STEBANI, J.; MAIER, G.; BACHER, E.: „Schneller – umfassender - effizienter“, Kunststoffe 9 (2007), S. 227–231
- [STA98] STACHEL, P.: „Long-Fibre Reinforced Thermoplastics“ Composites, 29 (1998), S. 85 ff.
- [STE02a] STEBANI, J.: „Die Kunststoffwelt im Umbruch. Neue Konzepte, neue Unternehmen, neue Chancen“, Kunststoffe 6 (2002), S. 28–31
- [STE02b] STEBANI, J.: „Trends in der Kunststoffforschung. Externe Dienstleister als dritte Säule der Forschung und Entwicklung“, Kunststoffe 10 (2002), S. 24–27



# **Spritzgegossene Sandwichstrukturen – Leichtbau und effiziente Produktion vereint**

Professor Dr.-Ing. **V. Altstädt**,  
Neue Materialien Bayreuth GmbH, Bayreuth

## **Motivation**

Das thermoplastische Schaumspritzgießen hat sich in den vergangenen Jahren im Automobilsektor insbesondere für nicht sichtbare Teile zunehmend etabliert. Aber auch in anderen Anwendungsbereichen, wie z. B. Haushaltswaren oder Unterhaltungselektronik sind geschäumte Spritzgießformteile heute weit verbreitet. Ursächlich dafür sind die bekannten Vorteile, wie Gewichtseinsparung, Reduzierung der Zykluszeit und der notwendigen Anlagengröße sowie Minimierung des Verzugs. Die Optimierung der meist schlierigen Bauteiloberflächen ist Gegenstand aktueller Forschungsarbeiten, um auch im Bereich der automobilen Sichtteile die genannten Vorteile nutzen zu können.

Um neben dem einfachen Austausch von bestehenden Kunststoffteilen durch geschäumte Formteile, auch neue, vorzugsweise strukturelle Anwendungen erschließen zu können, beschäftigt sich die Neue Materialien Bayreuth GmbH (NMB) intensiv mit der Verarbeitung von faserverstärkten, thermoplastischen Kunststoffen, insbesondere in Verbindung mit Spritzgießprozessen. Das Schaumspritzgießen ermöglicht es, Kernstrukturen mit geringer Dichte zu erzeugen und so die mechanischen Eigenschaften durch Ausnutzung des „Sandwicheffekts“ zu erhöhen [1]. Ziel aktueller Forschungsarbeiten der NMB ist es daher, Verarbeitungsprozesse mit kurzen Zykluszeiten für voll-thermoplastische Sandwichstrukturen, bestehend aus faserverstärkten Deckschichten und geschäumten Kernmaterialien, d. h. für hochsteife, leichte und recyclingfähige Kunststoffformteile, zu entwickeln. Um derartige Verfahren im kostengetriebenen Automobilmarkt etablieren zu können, ist es das Ziel gegenwärtiger Projekte, die Produktionsverfahren für die genannten Verbundbauteile unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten zu optimieren. Unabdingbar sind Prozesse, die es erlauben, die Bauteile in einem Fertigungsschritt, nachbearbeitungsfrei zu produzieren.

## 1. Leichtbau durch Sandwichstrukturen

Die Sandwich-Theorie beschreibt einen mindestens dreilagigen Aufbau, aus zwei steifen Deckschichten und einer leichten, schubsteifen Kernschicht (vgl. Abb. 1). Durch die Kombination von hochsteifen Materialien als Deckschicht des Lagenaufbaus und leichten Kernkomponenten, lassen sich Materialverbunde herstellen, welche gewichtsbezogen im Vergleich zu einem kompakten Aufbau besonders hinsichtlich ihrer Biegeeigenschaften Vorteile bieten [2]. Bei der Sandwichbauweise handelt es sich um ein sehr effizientes Leichtbauprinzip, allerdings ist die fertigungstechnische Umsetzung in der Praxis bisher aufwändig. Sandwichstrukturen werden derzeit daher vorwiegend in der Luftfahrt und bei Sportartikeln eingesetzt. Entsprechend hoch ist der Bedarf an effizienten Herstellungsverfahren für eine Übertragung in die automobiler Großserie.

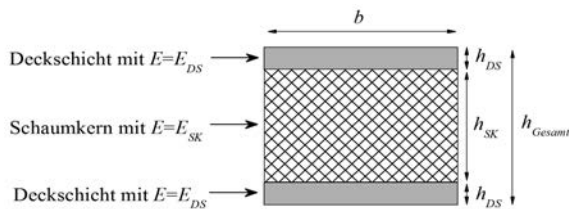


Bild 1: Schematische Darstellung einer Sandwichstruktur

Um mit bestehenden Strukturen im Automobilbau konkurrieren zu können, müssen die beschriebenen Sandwichverbunde nicht nur leichter und günstiger in der Herstellung sein, sondern auch mindestens die relevanten mechanischen Eigenschaften der Benchmarkmaterialien erzielen. Vergleicht man die Biegesteifigkeit eines Stahl- oder Aluminiumbleches mit einem polymeren Sandwichaufbau, so sind die Metalle deutlich unterlegen (siehe Diagramm 1). Bezieht man sich auf einen realistischen Vergleich mit einem U-Profil, so wird der Unterschied deutlich gemindert. Das bedeutet, ein Vorteil in den mechanischen Eigenschaften alleine reicht nicht aus, um Sandwichbauteile in flächigen Strukturen einzusetzen. Die Wirtschaftlichkeit stellt sich nur in Kombination mit effizienten Fertigungsprozessen dar.



### Biegesteifigkeit bei gleichem Flächengewicht

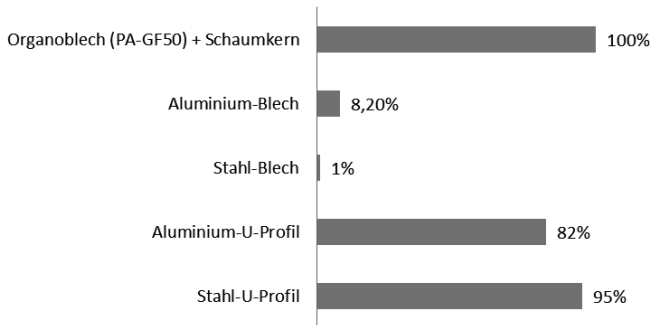


Diagramm 1: Vergleich der Biegesteifigkeit einer polymeren Sandwichstruktur mit metallischen Referenzen (8 mm Sandwichdicke, 1 mm Deckschichtdicke / U-Profil mit 8 mm Höhe als Referenz / Breite jeweils 50 mm)

## 2. Wege zum thermoplastischen Sandwich

Wege zur Herstellung polymerer Sandwichstrukturen sind gegenwärtig vor allem in der Luftfahrtindustrie unter Verwendung von Decklagen mit duroplastischer Matrix etabliert [3]. Im Bereich der thermoplastischen Kunststoffe ist das Schaumspritzgießen in Kombination mit einer Öffnungsbewegung des Werkzeugs bekannt [4]. Aus diesem Verfahren resultieren Integralschäume mit kompakten Deckschichten und porösen Kernstrukturen. Allerdings wird dabei in aller Regel nur ein einzelnes Polymer verarbeitet und die Stärke der kompakten Randschichten kann nur über die thermischen Randbedingungen eingestellt werden.

### 2.1. Herstellung von Sandwichstrukturen durch Heißpressen

Ein erster Ansatz zur Herstellung voll-thermoplastischer Sandwichstrukturen ist an die Verfahrensweise des Verklebens duroplastischer Lamine mit einem Schaumkern angelehnt [5]. Erste Versuche, ein thermoplastisches Sandwich durch Heißpressen und somit Verschweißen von Schaumkern und Deckschichten herzustellen wurden bereits 1988 durchgeführt [6]. Allerdings ist das Verfahren durch die Druckfestigkeit der verfügbaren Schaumkerne

stark eingeschränkt, weshalb meist teure Hochtemperaturschäume als Kernmaterialien verwendet werden, auch wenn „nur“ ein Polypropylen als Deckschicht zum Einsatz kommt [7].

Bei der NMB wurde im Jahr 2015 ein Materialverbund aus einem PEI (Polyetherimid) Schaumkern sowie endlosfaserverstärkten Deckschichten, ebenfalls mit PEI-Matrix, nach diesem Prinzip aufgebaut. Dazu wurde der in Abb. 2 schematisch dargestellte Verfahrensablauf verwendet: Der Verbund wurde in zwei Schritten durch Verpressen einer mittels Infrarotstrahlung vorgeheizten PEI-Schicht mit dem Schaumkern hergestellt.

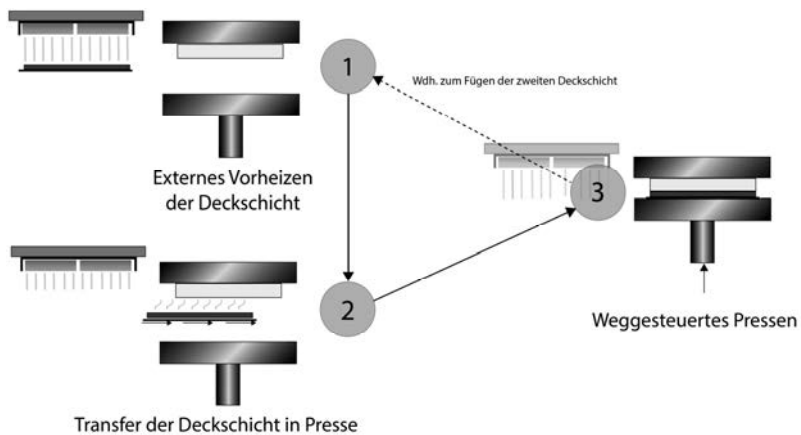


Bild 2: Herstellung von Sandwichstrukturen durch Heißpressen – Verfahrensablauf

Durch die Optimierung der Prozessbedingungen konnte eine ausgezeichnete Anbindung der Deckschichten an den Kern erzielt werden. Tabelle 1 fasst die Kenngrößen der hergestellten Sandwichpaneele, inklusive der zugehörigen Kerndichten und der resultierenden Flächenge-  
wichte zusammen.

Tabelle 1: Überblick über die hergestellten Sandwichpanele

Deckschicht	Lagenanzahl	Kern	Dichte	Flächengewicht
<b>Phenol/GF34</b>	2	Nomex®	48 kg/m <sup>3</sup>	1,31 kg/m <sup>2</sup>
<b>PEI/GF48</b>	2	PET	60 kg/m <sup>3</sup>	1,85 kg/m <sup>2</sup>
<b>PEI/GF48</b>	2	PEI	60 kg/m <sup>3</sup>	1,83 kg/m <sup>2</sup>
<b>PEI/GF48</b>	2	PEI	80 kg/m <sup>3</sup>	2,10 kg/m <sup>2</sup>

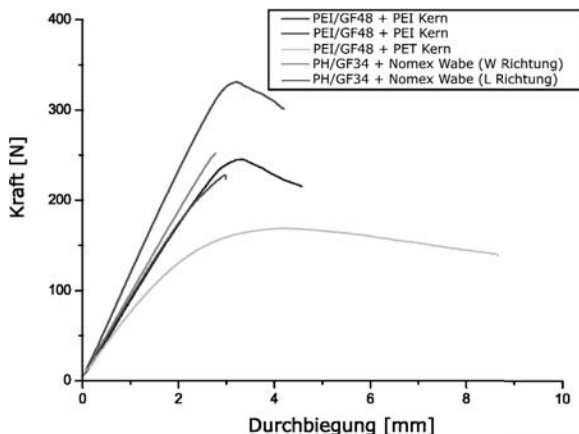


Diagramm 2: Mechanische Eigenschaften der voll-thermoplastischen Sandwichstrukturen unter 4-Punkt-Biegebelastung

Weiterhin wurden mechanische Kennwerte der Verbunde unter 4-Punkt-Biege-Belastung ermittelt. Bei einer optimierten Prozessführung konnten für den PEI-Verbund mit Sandwichstrukturen bestehend aus Nomex® Honeycombs und duromeren Deckschichten vergleichbare Biegesteifigkeiten realisiert werden (vgl. Diagramm 2). Die Honeycomb-basierten Sandwichaufbauten weisen zwar ein geringeres Flächengewicht auf, jedoch liegen die Kosten für den Honeycomb-Kern signifikant höher, als für die verwendeten PEI-Schäume. Weiterhin ist zu betonen, dass sich unter Verwendung der thermoplastischen Materialien ein sortenreines,

rezyklierbares Sandwich herstellen lässt. Die niedrigen Flächengewichte, die hohe Steifigkeit und besonders die inhärente Flammwidrigkeit des PEI prädestinieren die genannten Aufbauten für Anwendungen in der Luftfahrt.

## 2.2. In-situ Herstellung von Schaumkernen durch Spritzgießen

Neben dem Verpressen von thermoplastischen Deckschichten mit Schaumkernen, beschäftigen sich aktuelle Forschungsarbeiten verschiedener Gruppen auch mit dem Schaumspritzgießen zwischen zuvor eingelegte Organobleche [8,9]. Basis des Verfahrens ist das in Abb. 3 dargestellte Hochdruckschaumspritzgießen mit atmendem Werkzeug.

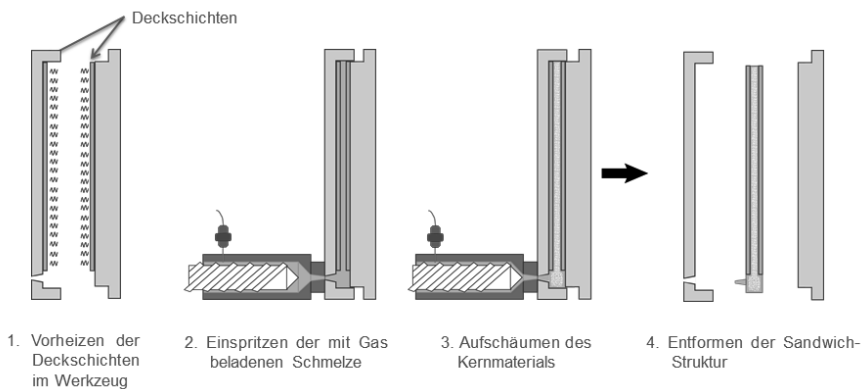


Bild 3: Schematische Darstellung der Prozessschritte für das Schaumspritzgießen zwischen faserverstärkte Deckschichten

Im Unterschied zum konventionellen Schaumspritzgießen können durch die endlosfaserverstärkten Deckschichten signifikant höhere Festigkeiten und Steifigkeiten in den Außenlagen erreicht werden. Die isolierende Wirkung der Deckschichten führt zu einer langsameren Erstarrung des Kernmaterials, wodurch Schäume mit Dichten unter  $300 \text{ kg/m}^3$  erzeugt werden können. Für die hier beschriebenen Versuche wurden unidirektionale, vorkonsolidierte

Fasergelege mit PP-Matrix und einem Glasfaseranteil von 60 Gew.-% sowie ein PP-Eigencompound mit besonders optimierten Schäumeigenschaften verwendet (Abb. 4).



Bild 4: In-situ geschäumte Bauteile mit PP-GF60 Deckschicht und PP-HMS Schaumkern

Um ein Verfahren für die Großserie zu qualifizieren, sind Zykluszeiten von unter 60 Sekunden pro Bauteil für das Spritzgießen von Großformteilen heute obligat. Im gezeigten Verfahren wird diese Zielvorgabe mit einer durchschnittlichen Zykluszeit von etwa 160 Sekunden deutlich überschritten. Maßgeblich dafür ist mit ca. 100 Sekunden die Vorheizzeit des Organoblechs im Werkzeug (vgl. Abb. 5). Durch ein automatisiertes Werkzeugkonzept mit externer, dem Prozess vorgeschalteter Erwärmung der Organobleche kann dieser Zeitanteil aus dem Prozessablauf separiert werden, wodurch Zykluszeiten in der als Ziel genannten Größenordnung von einer Minute erreicht werden können. Verbleibende, die Zykluszeit bestimmende Größe ist nun die Restkühlzeit, welche durch die isolierenden Deckschichten und die geringe Wärmeleitfähigkeit des geschäumten Kerns bei vergleichsweise hohen Bauteildicken von 6 bis 10 mm bis zu 50 Sekunden betragen kann.

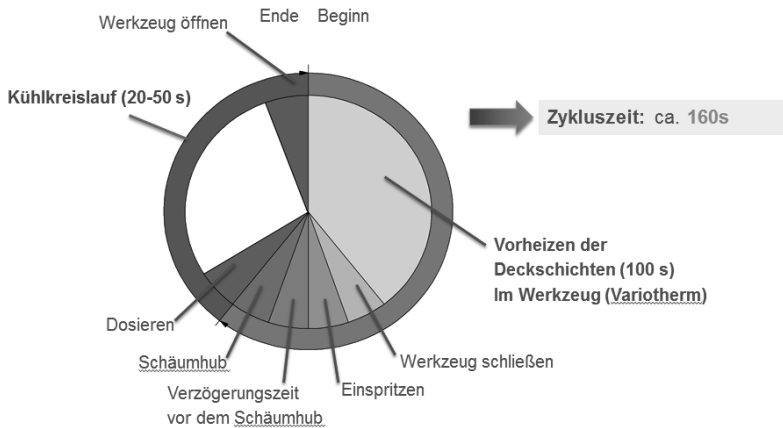


Bild 5: Anteile der einzelnen Verfahrensschritte an der Gesamtzykluszeit

Aus den Erstarrungsbedingungen leiten sich auch die Anforderungen an das zu schäumende Kernmaterial ab: Für die Stabilisierung des Schaums sind eine hohe Schmelzestefigkeit sowie eine hohe Schmelzedehnbarkeit zur Realisierung relevanter Expansionshübe und somit großer Abstände zwischen den faserverstärkten Deckschichten entscheidend.

Großes Potential bietet die Technologie auch für Werkstoffkombinationen auf Basis von polaren Polymeren, welche eine deutlich bessere Haftung zwischen Spritzgussmasse und eingelegtem Organoblech erwarten lassen.

Die, für die im In-situ-Verfahren hergestellten Verbundbauteile ermittelten Biegesteifigkeiten (4-Punkt-Biegung) zeigen eine gute Übereinstimmung der experimentell ermittelten Werte mit den theoretisch zu erwartenden Werten (vgl. Diagramm 3). Mit zunehmendem Abstand der Deckschichten, d. h. steigendem Aufschäumgrad des Kerns nimmt die Biegesteifigkeit erwartungsgemäß zu.

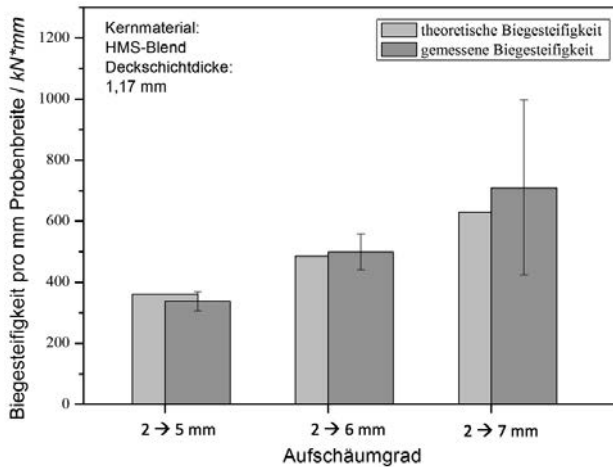


Diagramm 3: Einfluss des Aufschäumgrads und der Probekörperdicke auf die Biegesteifigkeit der in-situ hergestellten Sandwich-Strukturen (4-Punkt-Biegung)

Am kritischsten für das Versagensverhalten, insbesondere bei hohen Aufschäumgraden, ist die Haftung zwischen Deckschicht und Schaumkern. Anhand der in Diagramm 4 exemplarisch dargestellten Einzelmessungen, lässt sich ein frühzeitiges Versagen des Verbundes erkennen sobald eine Delamination zwischen Deckschicht und Kern auftritt.

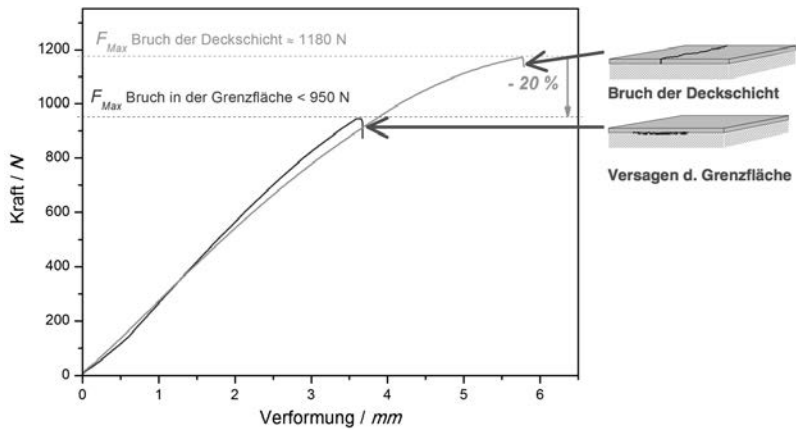


Diagramm 4: Einfluss der Haftung zwischen Kern und Deckschicht auf das Versagensverhalten (Aufschäumgrad 2 → 5 mm)

Erwähnenswert sind zudem die Isolationseigenschaften der Verbundbauteile. Durch das Schäumen des Kerns kann, wie aus Diagramm 5 ersichtlich, eine deutliche Reduzierung der Wärmeleitfähigkeit im Vergleich zu den kompakten Materialien erreicht werden. Die Isolationswirkung der thermoplastischen Sandwichstrukturen eröffnet zusätzliches Anwendungspotential unter anderem im Bereich der Elektromobilität, da bei E-Fahrzeugen die Heizung durch die Abwärme des Verbrennungsmotors entfällt.



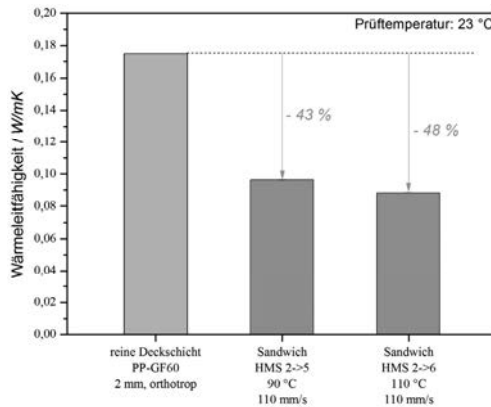


Diagramm 5: Wärmeleitfähigkeit von in-situ hergestellten Sandwich-Strukturen im Vergleich zu kompakten Materialien

### 3. Ausblick

Anstatt die faserverstärkten Deckschichten erst zu erwärmen, anschließend in das Werkzeug einzulegen und anzuspritzen, ist es naheliegend, den Sandwichaufbau in einem Coinjektionsprozess (vgl. Abb. 6) herzustellen. So können die steifen Deckschichten aus einem hochgefüllten Polymer und der Kern aus einem gut schäumbaren niedrig- oder ungefüllten Thermoplast in einem Prozess ohne Handling hergestellt werden. Durch einen anschließenden Werkzeugöffnungshub kann auch hier die Dichte im Kern weiter reduziert werden.

Die zu erwartenden mechanischen Eigenschaften der so erzeugten Kurzfaserverbunde liegen zwar unter denen der beschriebenen, endlosfaserverstärkten Verbundstrukturen, durch die günstigen Ausgangsmaterialien und den deutlich geringeren Automatisierungsaufwand im Vergleich zum Organoblechhandling stellt das Verfahren insgesamt jedoch eine wirtschaftlich interessante Alternative für Großserienanwendungen dar. Es ergeben sich mit dem Standardschaumspritzgießen etwa vergleichbare Herstellkosten bei deutlich besseren Eigenschaften (vgl. auch Abbildung 7). Die Neue Materialien Bayreuth GmbH arbeitet aktuell an der Umsetzung dieser Verfahrensvariante und der Ableitung der möglichen Prozess- und Bauteileigenschaften.

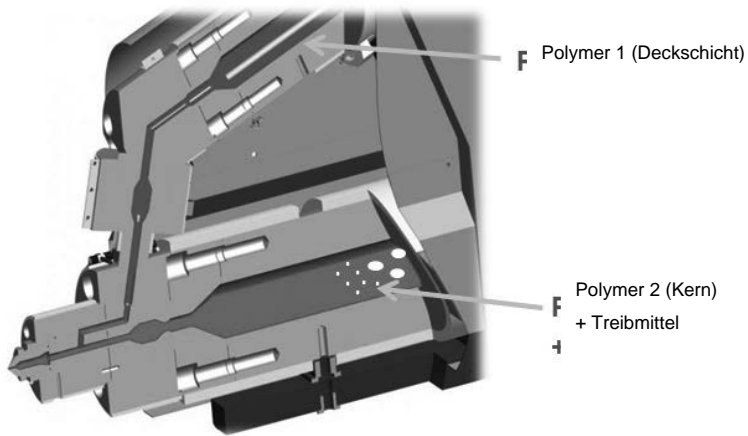


Bild 6: Aufbau einer Coinjektionsspritzeinheit [Quelle: Billion®]

#### 4. Fazit

Dem technologischen Ziel, der effizienten Herstellung von hochsteifen Sandwichstrukturen auf Basis von voll-rezyklierbaren Materialverbunden ist man in jüngster Zeit ein gutes Stück näher gekommen. Durch die zielgerichtete Kombination verschiedener Verfahren wurden anwendungsorientiert technologische Lösungen erarbeitet und unter wirtschaftlichen Aspekten zielgerichtet weiterentwickelt (Abb. 7). Insbesondere für die in-situ-Herstellung von thermoplastischen Sandwichstrukturen durch Schaumspritzgießen zwischen Organobleche konnte gezeigt werden, dass anwendungsrelevante Zykluszeiten kleiner 60 Sekunden erreichbar sind. Die hohe Prozessflexibilität bei der Herstellung polymerer Leichtbaustrukturen stellt letztlich einen entscheidenden Vorteil gegenüber anderen Leichtbaumaterialien dar.

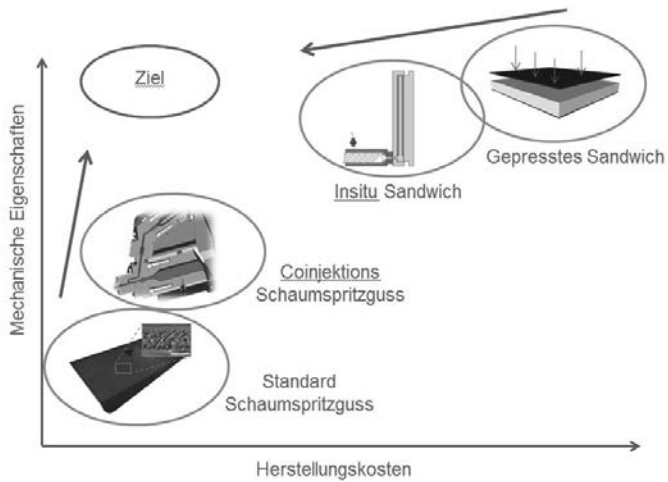


Bild 7: Mechanische Eigenschaften vs. Kosten – Überblick über die dargestellten Verfahren

## Literatur:

- [1] Fathi, A., Wolff-Fabris, F., Altstädt, V., Gätzi, R.: An investigation on the flexural properties of balsa and polymer foam core sandwich structures: Influence of core type and contour finishing options. *Journal of Sandwich Structures and Materials*; 2013; 15(5): 487–508.
- [2] Altstädt, V., Diedrichs, F., Lenz, T., Bardenhagen, H., Jarnot, D.: Polymer foams as core materials in Sandwich Laminates. *Polymer & Polymer Composites*; 1998; 6(5), 295–304.
- [3] Herrmann, A., Zahlen, P., Zuardy, I.: Sandwich Structures Technology in Commercial Aviation. In: O. T. Thomsen, E. Bozhevolnaya, A. Lyckegaard (Hrsg.), *Sandwich Structures 7: Advancing with Sandwich Structures and Materials SE - 2* (pp. 13–26). Springer Verlag, Dordrecht (Niederlande), 2005
- [4] Altstädt V., Mantey A. *Thermoplast-Schaumspritzgießen*, Carl Hanser Verlag, München, 2011
- [5] Grünewald, J., Parlevliet, P., Altstädt, V.: Manufacturing of thermoplastic composite sandwich structures: A review of literature. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*; 2015; <http://doi.org/10.1177/0892705715604681> (published online)
- [6] Breuer, U., Ostgathe, M., Neitzel, M.: Manufacturing of All-Thermoplastic Sandwich Systems by a One-Step Forming Technique. *Polymer Composites*; 1998; 19(3), 275–279.
- [7] Okolieocha, C., Raps, D., Subramaniam, K., Altstädt, V.: Microcellular to nanocellular polymer foams: Progress (2004–2015) and future directions – A review. *European Polymer Journal*; 2015; 73, 500–519.
- [8] Altstädt, V., Beck, J., Mühlbacher, M.: Großserientaugliche thermoplastische Sandwichstrukturen. *Lightweight Design*; 2014; 7(4), 56–62.
- [9] Menrath, A., Henning, F., Huber, T., Roch, A., Riess, C.: Foam-injected sandwich panels with continuous-reinforced facings. In: *Proceedings of PPS-29: The 29th International Conference of the Polymer Processing Society-Conference Papers*; 2014; 1593(1), 477–481.

# 3D-Prozesssimulation bei Spritzgieß-Sonderverfahren – Möglichkeiten und Grenzen

**M. Kurz**, SimpaTec GmbH, Reutlingen

## Agenda

- SimpaTec
- Physikalisches und chemisches Schäumen
- Gasinjektionstechnik (GIT)
- Wasserinjektionstechnik (WID)
- Resin Transfer Molding (RTM)
- Zusammenfassung



**Moldex3D**

## SimpaTec - Meilensteine

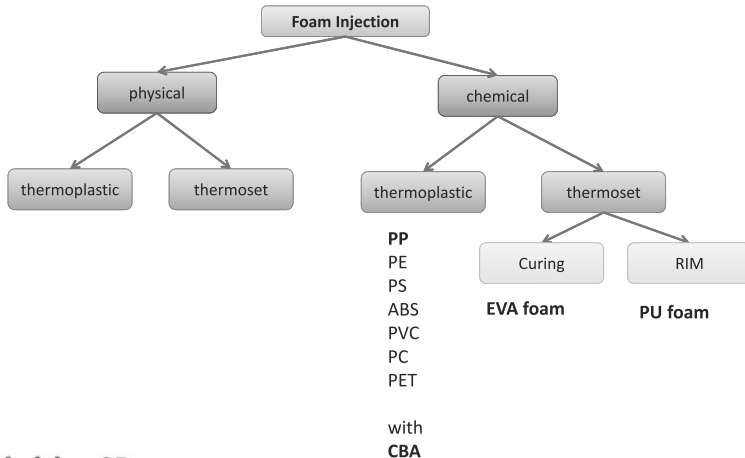
- gegründet 1/2004
- Partner von **Moldex3D**
- seit 2004 in Deutschland
- seit 2005 in BeNeLux
- seit 2006 in Frankreich, Schweiz und Österreich
- Zentrale in Aachen, Geschäftsstellen in Reutlingen und Suhl
- weitere in Guebwiller, France und in Bangkok, Thailand
- seit 10/2007 Reseller von Beaumont Technologies Inc.
- seit 2011 – Reseller von accuform, CZ
- seit 01/2013 Reseller von Elysium, Japan
- 8/2013 – CoreTech Award as „Top Channel Partner for Outstanding Achievement“
- 2/2015 – CoreTech Award as „Top Channel Partner for Outstanding Achievement“



**Moldex3D**

4

## Übersicht Schäumen



**Moldex3D**

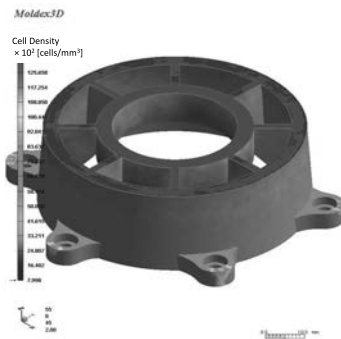
## Simulation von Schäumprozessen in Moldex3D

- Voller 3D Simulationsansatz zur genauesten Vorhersage der Mikrostruktur und der Fließprozesse.
- Vorhersage der Zelldichtenverteilung, der Zellengröße unter simultaner Berücksichtigung der Zellnukleierung und des Zellenwachstums.
- Berücksichtigung der Interaktion zwischen Zellbildung und des Schmelzefflusses während der Formteillfüllung.
- Auswirkung der Zellstruktur auf den Bauteilverzug.

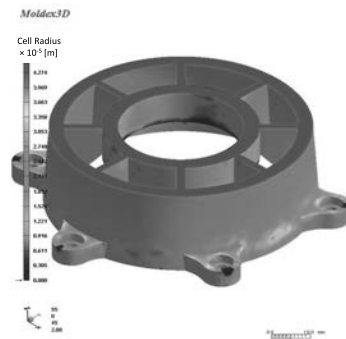
Moldex3D

## MuCell® Simulationsergebnisse

Mikrozelluläre Zelldichtenverteilung



Zellgrößenverteilung



Moldex3D

## MuCell® komplette Prozesssimulationen

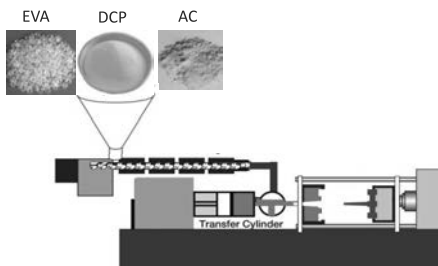
- MuCell® kombiniert mit zusätzlichem Nachdruck
- MuCell® kombiniert mit einer Core-Back Funktion
- MuCell® kombiniert mit Gasgegendruck
- MuCell® kombiniert mit variothermer Temperierung
- MuCell® Process Informationen bereitgestellt für die Strukturmechanik



15

## EVA Schäumen

EVA Copolymer, Vernetzungsmittel (DCP) und chemisches Treibmittel (AC)  
 Diese Kombination wird auf einer Standardspritzgießmaschine verarbeitet  
 Bauteilfüllung und Vernetzung  
 Nach dem Werkzeugöffnen startet das Aufschäumen  
 Freies Aufschäumen

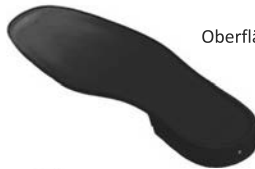
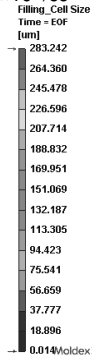


23

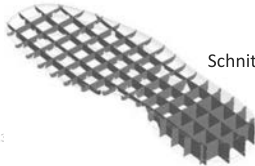


## EVA Fallbeispiel: Expansion nach Werkzeugöffnung

Durchschn. Zellgröße von 5.8 bis 150  $\mu\text{m}$   
 $2 \times 10^6 / \text{cc}$

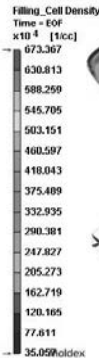


Oberfläche

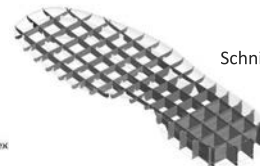


Schnitte

Durchschn. Zelldichte von



Oberfläche



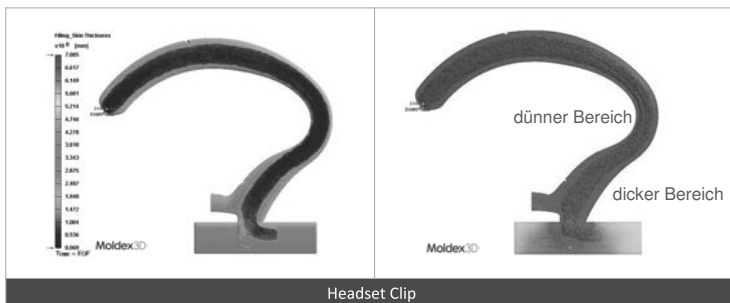
Schnitte

Moldex3D

24

## GIT Dickenverteilung Außenhaut

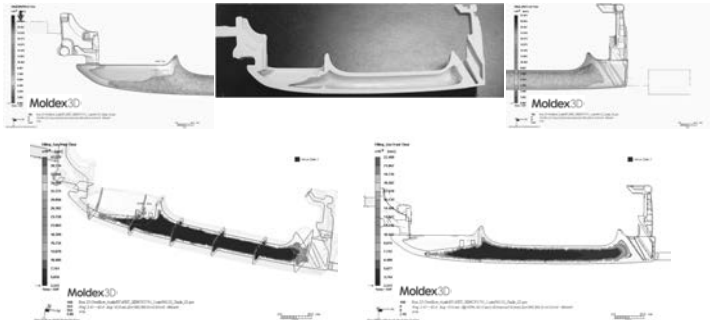
Moldex3D simuliert die Bauteildickenverteilung nach der Gasinjektion mit einem vollen 3D Ansatz. Hierbei ist eine Injektion nach einer Teilfüllung ebenso möglich wie das simulieren einer Überlaufkavität



Moldex3D

## GIT Vergleich mit Realbauteil

Der Vergleich mit einem Bauteilschnitt zeigt die Vorhersagequalität der Wandstärkenverteilung



Mit Hilfe der Simulation konnte die Wandstärkenverteilung sehr genau vorhergesagt werden und die Bauteile weiteren Gewichtsoptimierungen unterzogen werden.

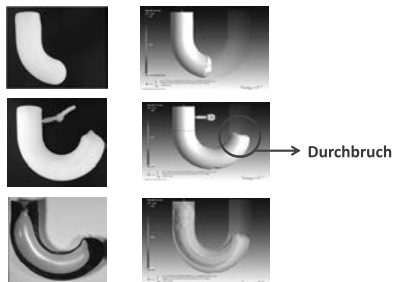
Ref: <http://www.cinpres.com/>

**Moldex3D**

## WAIM Anwendungsbeispiel, Bauteilfüllung

Nach einer Teilfüllung wird die Wasserinjektion gestartet und die Wasserphase simultan mit der Schmelzefront gerechnet.

Durch das Variieren des Anspritzpunktes kann der Fluss des Wassers verändert und somit ein Durchbrechen des verhindert werden.

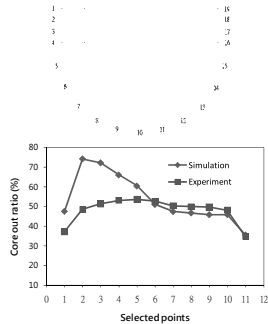
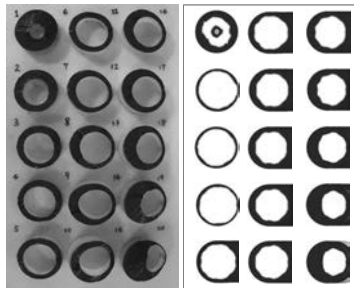


Ref: Che-Chi, Liu and S.-J. Liu, "A Study of the Water Assisted Injection Molding of Thermoplastic Elastomers", Master's thesis in department of mechanical engineering, (2007)

**Moldex3D**

## WAIM Wandstärkenverteilung

Die Wandstärkenverteilung zeigt potentielle Eckeneffekte und mögliche Fehlstellen durch einen Durchbruch auf.

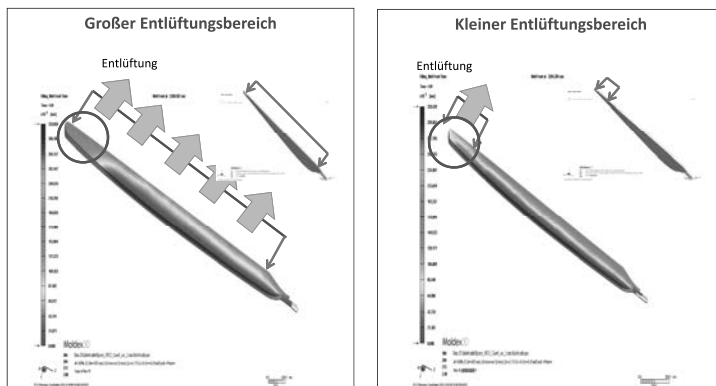


Ref: Che ChiLiu and S.-I. Liu, "A Study of the Water Assisted Injection Molding of Thermoplastic Elastomers",  
Master's thesis in department of mechanical engineering, (2007)

Moldex3D

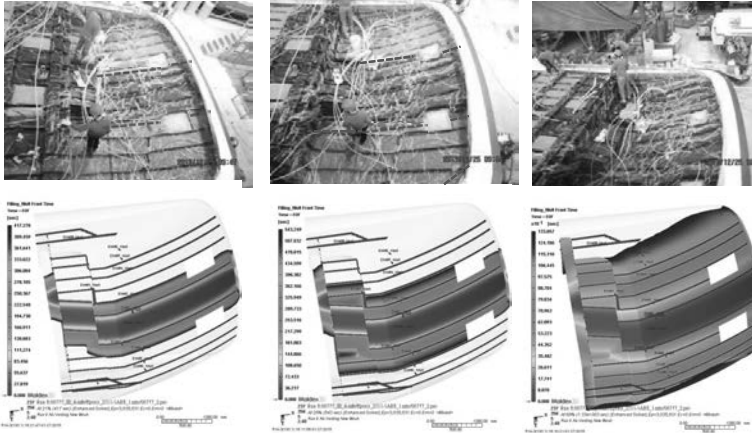
## RTM Entlüftungseffekte beim Füllverhalten

Filling pattern with different length of venting boundary



Moldex3D

## RTM Anwendungsbeispiel, Füllverhalten



**Moldex3D**

# Spritzgießen & Thermoformen: Neue Ansätze für hochwertige Oberflächen

Dr.-Ing. **M. Schuck**, HBW-Gubesch Thermoforming GmbH, Wilhelmsdorf

## 1. Einleitung

Prinzipiell lassen sich die für die Kunststoffverarbeitung benötigten Fertigungsverfahren nach DIN 8580 in vier Gruppen unterteilen (vgl. Bild 1):

- Umformen (z.B. Thermoformen)
- Fügen (z.B. Schweißen, Umspritzen)
- Urformen (z.B. Spritzgießen)
- Trennen (z.B. Stanzen, Lasern)

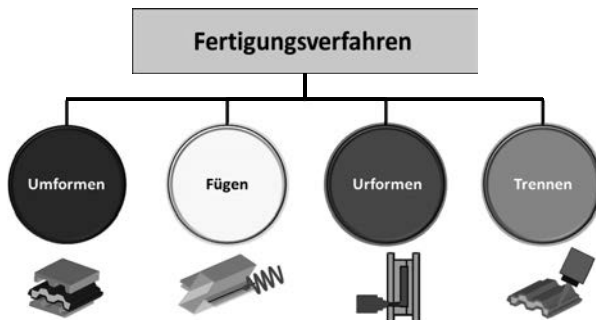


Bild 1: Fertigungsverfahren nach DIN 8580

Ansatz der vorzustellenden neuen Technologien die u.a. Spritzguss und Thermoformen beinhalten ist die Kombination der o.g. Fertigungsverfahren in einer durchgängigen Prozesskette. Dabei ist es wichtig an welcher Position in der Prozesskette das jeweilige Fertigungsverfahren steht. Prinzipiell lassen sich die Fertigungsverfahren additiv oder multiplikativ beliebig miteinander verknüpfen. Durch diese geschickte Prozessdiversifizierung können neue, hochwertige Oberflächen geschaffen werden.

## 2. Verfahrensübersicht – Dekoration im Innenraum

Es existieren mannigfaltige Verfahren zur Herstellung von dekorierten Bauteilen (vgl. Bild 2). Allen gemein ist, dass durch ein ansprechendes Äußeres, die durch den Spritzguss entstehende Oberfläche, kaschiert werden soll. Prinzipiell kann man dabei noch unterscheiden ob es sich um Bauteile mit einer weiteren Funktion handelt (z.B. bewegliche, dekorierte Klappe) oder reine Zierbauteile. Zur kostengünstigen Dekoration eignen sich Verfahren wie Lackieren, Galvanisieren, Heißprägen, einer Einbringung von Narbungen direkt im Spritzguss oder Verfahren die auf einer Folientechnik beruhen.

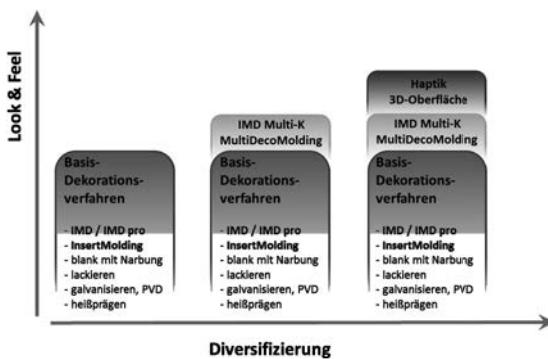


Bild 2: Dekorationstechnologien für Designdiversifizierung

Um die Gestaltungsfreiheit zu erhöhen, eine Designdiversifizierung zu ermöglichen und die Prozesskosten im Blick zu behalten, müssen aber neue Technologien bereitgestellt werden, die für den Endanwender den Mehrwert des Bauteils erlebbar machen. Diese Erlebbarkeit lässt sich im Fall von Dekorbauteilen über den *Look&Feel* des dekorierten Bauteils definieren. Als Beispiel für einen erlebbaren Mehrwert ist z.B. die Integration von Touchsensoren, Licht oder Haptik zu nennen. Durch geschickte Verfahrenskombination oder der Neupositionierung der zur Bauteilherstellung benötigten Fertigungsverfahren innerhalb der Gesamtprozesskette ist es möglich die bestehenden Verfahren zu nutzen um diesen Mehrwert am Dekorbauteil erlebbar zu machen. Im Folgenden wird auf die einzelnen umgesetzten Technologien für diesen Mehrwert eingegangen.

## 2.1. Basis Dekorationsverfahren - IM (Insert-Molding) / IMD-Verfahren (In-Mold-Decoration)

Die als Basisdekorationsverfahren für Kunststoffbauteile bezeichneten Technologien spielen eine auf dem Markt etablierte Technik mit zahlreichen Anbietern wieder. Zwei Technologien, die Insert-Molding- (IM) und die In-Mold-Decoration-Technologie werden als folienbasierte Verfahren näher beleuchtet.

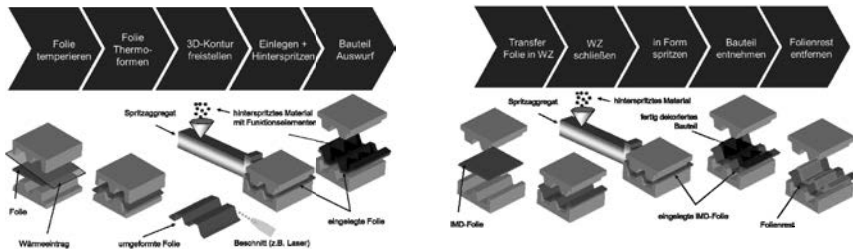


Bild 3: links, Prozessschritte Insert-Molding (IM)  
rechts, Prozessschritte In-Mold-Decoration (IMD)

Ein klassisches Verfahren der Dekorationstechnik im Spritzguss ist das Folienhinterspritzen auch Insert-Molding (IM) oder Film-Insert-Molding genannt. Dabei werden tiefgezugene oder thermogeformte Folien in einem ersten Prozess hergestellt. Das etablierte Verfahren Thermoformen gliedert sich dabei wie in Bild 3 links zu erkennen in die Schritte Aufwärmen der Folie, Umformen der Folie durch Vakuum und/oder Überdruck mittels eines einseitigen Werkzeugs und anschließendem Abkühlen sowie einem separaten Trennprozess zur Herstellung der Endkontur des Inserts (z.B. Stanzen, Lasern, Fräsen). Die verwendete Folie besteht aus einer Trägerschicht die in mehreren Lagen mit Farb-, Muster- und Schutzschichten bedruckt wurde, wobei der gestalterischen Freiheit hier kaum Grenzen gesetzt sind. Das Insert wird in einem anschließenden Spritzgießprozess hinterspritzt und funktionalisiert. Das IM zeichnet sich durch einen schnellen Dekorationswechsel in laufender Serie von Schuß zu Schuß, guter Kratz- und Chemikalienbeständigkeit, hoher Designfreiheit und Tiefziehgraden sowie guten Langzeiteigenschaften aus. Ein weiterer Vorteil ist, dass es sich um ein trockenes und lösemittelfreies Verfahren handelt. Die für das Insert-Molding benötigten Fertigungsverfahren sind in drei sequentielle Schritte unterteilt: Umformen (Thermoformen der Folie), anschließendes Trennen (z.B. Stanzen) und dann ein Fügen durch den gleichzeitigen Umformprozess (Spritzgießen).

Während bei der IM-Technologie die Folie aus der ein Insert entsteht integraler Bestandteil des Bauteils wird dient bei der In-Mould-Decoration-Technologie (IMD) die Folie als Trägerfolie für eine Dekorationsschicht die nicht in das Bauteil mit einfließt. Wie in Bild 3 rechts beschrieben wird eine bedruckte Trägerfolie in den Spritzgussprozess eingebracht. Typischerweise geschieht dies mittels einer Rolle die über dem Werkzeug angebracht ist und auf der die Trägerfolie aufgespult ist. Die Folie wird von dieser oberen Rolle während des Prozess, von Schuss zu Schuss, durch die Kavität (In-Mould) auf eine unterhalb des Werkzeugs befindlichen Rolle aufgespult. Während des Einspritzvorgangs werden die farb- und mustertragenden Schichten von der Folie durch den Druck und die Temperatur der Spritzgussmasse von der Trägerfolie gelöst und auf die Oberfläche des Bauteils transferiert. Im Vergleich zur IM-Technologie ist die IMD-Technologie auf Grund der kürzeren Prozesskette kostengünstiger. Weiterhin sind sowohl Endlos- als auch Einzelbilddekore möglich. Im Vergleich zur IM-Technologie sind die dreidimensionalen Freiheitsgrade in der Gestaltung jedoch geringer, ein Umformen der Folie ist im Werkzeug nicht möglich. Die IMD-Technologie kombiniert drei Fertigungsverfahren in einem Schritt. Durch das Anspritzen der Folie wird mit dem urformenden Vorgang gleichzeitig das Dekor auf das Bauteil transferiert oder gefügt. Da über die Werkzeugtrennung ein Dekorabriss erzeugt wird, ist damit auch das Bauteil entlang der Trennung dekoriert und somit ist der Trennprozess integriert.

## **2.2. Multi-Dekorationsverfahren - MultiDecoMolding / Multi-K**

Die Multi-Dekorationsverfahren beruhen beide auf den Basistechnologien von Insert-Molding und In-Mold-Decoration.

Im MultiDecoMolding-Verfahren werden mehrere Inserts, die durch das oben beschriebenen Verfahren hergestellt werden, gemeinsam in ein und dasselbe Spritzgusswerkzeug eingelegt und in einem einzigen Schuss gemeinsam hinterspritzt. Herausforderung dabei ist die exakte Positionierung der Bauteile im Werkzeug sowie die Gestaltung des Spritzgießprozess um Hinterspülungen oder Verschieben der Inserts zu vermeiden. Der Mehrwert der IM-Technologie wird bei MultiDecoMolding noch ergänzt um eine hohe Gestaltungsfreiheit großflächiger, dreidimensionaler Bauteile, der Möglichkeit der Kombination von versch. Materialien (auch Echtmetall oder Echtholz) sowie einer verkürzten Prozesskette im Vergleich zu einer aufwändigeren Montagelösung von Einzelbauteilen. Die benötigten Fertigungsschritte sind identisch mit denen der IM-Technologie.

Das Multi-K-Verfahren basiert auf der IMD-Technologie. Bei Multi-K werden in einem Zweikavitätenwerkzeug Bauteile durch umsetzen zweimal sequentiell mittels IMD-Technologie dekoriert. In der ersten Kavität wird das Bauteil auf einer Ebene flächig hinterspritzt und de-



koriert. Dieses Bauteil wird dann in eine zweite Kavität gebracht wo es in einem zweiten Schuss, evtl. auch mit einem anderen Material, angespritzt und dieses Mal durch die Freigabe einer erweiterten Fläche / eines erweiterten Volumens in der Kavität auf einer anderen Ebene dekoriert wird. Die Mehrwerte der Technologie sind im Folgenden aufgezählt. Durch die unterschiedlichen Dekorationsebenen ist es dank Multi-K möglich die erste Dekoration perfekt in Einklang bzw. Abgrenzung zur zweiten Dekoration zu bringen. Mittels einer cleveren Gestaltung des Spritzgusswerkzeugs ist eine Einzelbilddekoration möglich. Damit sind glänzende und matte Dekore miteinander kombinierbar oder mittels transparenter Folien kann ein Tag- und Nachtdesign realisiert werden (vgl. Bild 4). Multi-K benötigt eine Automatisierung sowie Präzisionswerkzeuge und eine Zwei-K-SG-Maschine. Die benötigten Fertigungsschritte sind identisch mit denen der IMD-Technologie, wobei sie zweimal nacheinander angewandt werden.



Bild 4: Abdeckungen mit zwei Dekoren (Tag-Nacht-Design) im Multi-K-Verfahren

### 2.3. Dekorationsverfahren 3D-Optik / Haptik - IPDSkin-Technologie (Individual Post Decoration)

Das Individual-Post -Decoration-Skin-Verfahren (IPDSkin) deutet in seiner Namensgebung die bedeutenden Merkmale des Prozess an. Mittels dieser Technologie ist es möglich nicht nur geometrisch stark drei-dimensionale Bauteile im Nachgang zu dekorieren sondern auch zu den optischen Effekten auch haptische Effekte am Bauteil zu realisieren. Im IPDSkin-Verfahren werden bereits spritzgegossene Bauteile (Kunststoffträger) dank einer besonderen Maschinenteknik mittels einer haptisch gestalteten Folie die über eine kompatible Klebeschicht zum Kunststoffträger verfügt, durch Vakuum überformt und damit dekoriert (vgl. Bild 5). Zur besseren Verformbarkeit der Folie wird diese vor dem überformen noch erwärmt. Da, im Gegensatz zur IM- oder IMD-Technologie, keine hohen wirkenden Prozessdrücke die Oberfläche verformen können, bleibt die der Folie vorgegebene Oberflächenstruktur (Haptik)

erhalten. Zusammengefasst bietet IPDSkin den Mehrwert für das dekorierte Bauteil, dass eine Dekoration komplexer Bauteile, dass das Kaschieren und Dekorieren bereits fertiger Teile, dass eine haptische Oberfläche erschaffen wird sowie die Dekoration von Hinterschnitten durch ein frei sitzendes Bauteil möglich ist.

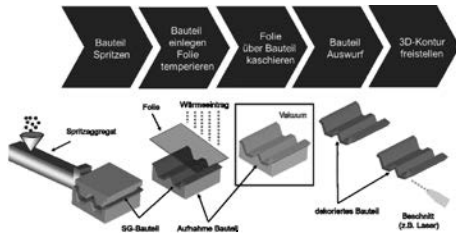


Bild 5: Prozessschritte IPDSkin (Individual Post Decoration)

Die für das IPDSkin benötigten Fertigungsverfahren sind im Grunde dieselben, die für das Insert-Molding-Verfahren (IM) benötigt werden. Das Verfahren unterscheidet sich lediglich durch die Reihenfolge in der die drei sequentielle Schritte durchgeführt werden: Zuerst wird in einem Spritzgießprozess das Bauteil hergestellt (Urformen), welches dann mittels IPDSkin-Maschinentechnik dekoriert wird (Umformen und Fügen). Durch das anschließende Fräsen oder Lasern wird das Bauteil auf Endkontur zugeschnitten (Trennen).

### 3. Zusammenfassung

Wie eingangs erwähnt ist es durch die geschickte Prozesskombination (Multi-K und MultiDecoModling) bzw. die Neuordnung der Prozesskette (IPDSkin) gelungen einen individuellen Mehrwert von Dekorbauteilen umzusetzen. Für den Kunden ist es offensichtlich, dass im Grunde durch die Verwendung von etablierter Technik und standardisierten Fertigungsverfahren neue Akzente gesetzt werden können ohne auf die Prozesssicherheit der etablierten Prozesse verzichten zu müssen. Gleichzeitig verbreitert sich für den Anwender die Einsatzvielfalt und die Gestaltungsfreiheit.

### 4. Ausblick

Wenn in Zukunft Fahrzeuge leichter werden müssen, da Herausforderungen an anderen Stellen im Fahrzeug zur Einsparung von Emissionen nur schwer und nicht ohne Hintertüren mit bestehendem Know-How umzusetzen sind und die Substitution von Metall durch

Kunststoffe (faserverstärkte Kunststoffe , FVK) für strukturelle und semi-strukturelle Bauteile wie B-Säule, I-Tafelträger oder Sitze dabei das Mittel der Wahl sind, so bietet, unter der Prämisse das der Fahrgastinnenraum weiterhin ansprechend gestaltet werden soll, die Kombination von FVKs und Dekor in einem Bauteil zur Einsparung von Montageschritten, zur Prozesskettenverkürzung und zur Kostenersparnis einen adäquaten Weg. Dabei steht wieder die Entwicklung der Fertigungstechnik an erster Stelle. Eine Lösung ist die Kombination der IM-Technologie mit der im FVK-Bereich (Composite-Bereich) etablierten Technik *SpriForm* zu kombinieren. Das Resultat, die *DeComposite*-Technologie, ist in Bild 6 zu sehen (FAKUMA Messe 2015).



Bild 6: Effizienzsteigerung durch die vollautomatische Herstellung eines endlos-faserverstärkten, hybriden Dekorbauteils im Spritzgießprozess  
(DeComposite = DeCor und Composite)

[1] DIN 8580



# Additive Manufacturing: Sinnvolle Anwendungsbereiche vs. Manufacturing Hype

Dipl.-Wirtsch.-Ing. (TU) **F. Müller**,  
EOS GmbH Electro Optical Systems, Krailling bei München

## Kurzfassung

Der Medienrummel um Additive Fertigung hat sich in den letzten Quartalen deutlich abgeschwächt – nun geht es primär um die tatsächliche Leistungsfähigkeit der einzelnen Technologien und der daraus resultierende Einsatzbereich. Dass sich Prototypen sinnvoll additiv fertigen lassen, ist hinreichend bekannt. Der Einsatz für Serienbauteile jedoch befindet sich noch im Aufbau und nur wenige Verfahren scheinen dafür geeignet. Pulverbettbasierte Verfahren haben hierbei große Vorteile und etablieren sich zunehmend, meist aber ohne große Publicity, da die Hersteller die Nutzung der additiven Fertigung als Wettbewerbsvorteil nutzen möchten. Mit zwei Anwendungsbeispielen aus dem Bereich der Manipulationsgreifer soll gezeigt werden, dass es bei der Additiven Fertigung weniger um eine Kosteneinsparungsmöglichkeit für bestehende Lösungen geht, sondern vielmehr beispielsweise Herstellungsmöglichkeiten und Rüstzeitverkürzungen und Gewichtseinsparungen den Einsatz mehr als rechtfertigen.

## 1. Heutige Einsatzgebiete und Abgrenzung der unterschiedlichen Verfahren

Additive Fertigungsanwendungen kommen heute hauptsächlich in folgenden Industrien zum Einsatz: Automobilbau, Luftfahrt/Aerospace, Medizintechnik, Consumer und dem relativ breit angelegten Industriesegment (z.B. Maschinenbau). Innerhalb der letzten Jahre hat sich gezeigt, dass gerade in diesen Industrien diverse Anwendungen sinnvoll als additives Bauteil ausgelegt werden können. Typischerweise sind dies Bauteile, die eine hohe geometrische Komplexität aufweisen und in relativ geringen Stückzahlen benötigt werden. Additive Fertigungsverfahren, insbesondere pulverbettbasierte Verfahren wie das Lasersintern, haben fast keine Einschränkungen bezüglich erzeugbarer Geometrien. Beispielsweise Entformungsschrägen, wie beim Spritzguss zu Entformung erforderlich, werden nicht benötigt. Somit kann sich der Konstrukteur voll der Bauteilfunktion widmen und muss die Formgebung nicht am Herstellverfahren ausrichten.

Da die Kosten pro Bauteilvolumen bei ähnlichen Volumenfüllraten faktisch gleich sind, fallen für kleine Losgrößen dieselben Kosten wie für große Losgrößen an. Im Extremfall werden

individualisierte Bauteile in Losgröße 1 hergestellt, d.h. jedes Bauteil im Bauvolumen hat einen anderen Datensatz zur Grundlage. Ein gutes Beispiel hierfür sind Schuheinlagen und Orthesen, die auf das individuelle Körperteil einer einzigen Person zugeschnitten sind. Heute übliche additive Herstellverfahren [1] für Kunststoffe nutzen als **Einsatzstoff entweder ein Filament, ein UV-aushärtendes Harz oder ein Pulver**. Der filamentbasierte Prozess nennt sich **Fused Deposition Modeling (FDM) bzw. Fused Filament Fabrication (FFF)**, dabei wird ein aufgeschmolzener Strang kontinuierlich mittels einer Düse lokal abgelegt und somit das Bauteil schichtweise erzeugt. Als harzbasierte Technologien gelten die **Stereolithografie (SLA)**, das **PolyJet Modelling (PJM)** und das **Digital Light Processing (DLP)**, wobei bei allen drei Verfahren eine Licht- oder Laserquelle zur lokalen Verfestigung eines flüssigen Harzes genutzt wird. Bei den pulverbettbasierten Verfahren unterscheidet man **Laser Sintern (LS, auch: SLS)**, **Selective Heat Sintering (SHS)** und **3D Printing (3DP)**: bei dem **LS-Verfahren** werden Pulverpartikel durch einen Laserstrahl aufgeschmolzen, beim **SHS-Verfahren** werden die Partikel durch einen Thermodruckkopf miteinander versintert und beim **3DP-Verfahren** werden sie durch ein Bindemittel vereint. Pulverbettbasierte Verfahren benötigen im Gegensatz zu allen anderen Verfahren keine zusätzlichen Stützstrukturen, da das Pulverbett an sich ausreichende Stützwirkung bietet.

Alle oben genannten Technologien haben Vor- und Nachteile, wodurch sich letztlich die Einsatzgebiete zuordnen lassen: **FFF/FDM-Anlagen** haben üblicherweise geringe Anschaffungskosten, erzeugen aber auch eher minderwertige Bauteiloberflächen und ein Einsatz als Funktionsteile ist selten. Bei industriellen Anlagen dieses Typs ist das Eigenschaftsprofil der Bauteile deutlich besser, die Bauteilmechanik in Baurichtung (Z) jedoch weiterhin mit starken Einschränkungen versehen.

**Stereolithografie-Bauteile** können hochgenau gefertigt werden und haben auch beste Oberflächeneigenschaften, zeigen aber im Dauergebrauch kein konstantes Eigenschaftsprofil aufgrund von Nachvernetzungsvorgängen im Polymer und der Hygroskopie von Epoxidharzen. Somit kommen auch SLA-Bauteile als Funktionsteile kaum zum Einsatz. **PolyJet Modeling-Bauteile** können aus mehreren unterschiedlichen Werkstoffen und Farben bestehen (auch Transparenz möglich), zeigen aber dieselben Probleme wie SLA-Bauteile (UV-Nachvernetzung und dadurch Eigenschaftsänderungen wie Sprödigkeit, Hygroskopie und dadurch Maßhaltigkeitsänderungen). Bauteile, die mittels **Digital Light Processing** hergestellt wurden, lassen sich relativ schnell herstellen (ein prominentes Beispiel ist die CLIP-Technologie der Firma Carbon3D, Inc.) und zeigen gute Bauteiloberflächen und Genauigkeiten, haben aber dieselben Einschränkungen wie SLA-Bauteile.

**Laser Sinter-Bauteile** zeichnen sich vor allem dadurch aus, dass sie aufgrund des vollständigen Aufschmelzens der Kunststoffpartikel gute mechanische Eigenschaften besitzen und somit später auch als Funktionsbauteile eingesetzt werden können. Außerdem müssen keine Stützstrukturen erstellt (und später entfernt) werden und es handelt sich um ein vergleichsweise schnelles und kostengünstiges Verfahren. Als Einschränkungen gelten aktuell die geringe Anzahl kommerzieller Werkstoffe (heute kommen fast nur PA12 und PA11-basierte Werkstoffe zum Einsatz) und die relativ raue Bauteiloberfläche. **SHS-Bauteile** sind aufgrund der geringen Anlagenkosten sehr günstig herstellbar, weisen aber aufgrund der gesinterten Morphologie schlechtere mechanische Bauteileigenschaften auf und sind somit im Funktionsbereich weniger gut nutzbar. **3D Printing** kann für die schnelle Herstellung von Bauteilen – auch im Büroumfeld – eingesetzt werden und Mehrfarbigkeit ist möglich. Nachteilig sind die Bauteilmechanik (vor der Infiltration) und die recht raue Bauteiloberfläche zu bewerten.

## 2. Additive Manufacturing als komplementäre Fertigungsmethode

Innerhalb der letzten Jahre hat sich ein regelrechter Additive Manufacturing Hype entwickelt, der unter anderem durch Zeitschriften wie dem „Economist“ mit der Proklamation der „Dritten Industriellen Revolution“ im April 2012 [2] und dem „Gartner Hype Cycle für Zukunftstechnologien“ [3], der jährlich aktualisiert wird und der die industrielle Additive Fertigung schon auf dem sog. „Pfad der Erleuchtung“ sieht, befeuert wurde. Über die letzten Jahre hat sich eine Normalisierung der zuvor überzogenen Erwartungen eingestellt und die additive Fertigung etabliert sich seither mehr und mehr als eine mögliche Fertigungsmethode – nicht jedoch als das alleinige und alles andere substituierende Herstellverfahren. Somit macht die Additive Fertigung den meisten, auf hohe Losgrößen ausgerichteten, Fertigungstechnologien keine Konkurrenz, sondern ergänzt diese lediglich. Der Megatrend der „Individualisierung“ und „Globalisierung/Dezentralisierung“ [4] und Einsparungspotentiale bei der Produktentstehung und vor allem bei der Produktnutzung vergrößert die aktuellen Einsatzgebiete zunehmend. Produkte mit zahlreichen Designänderungen im Produktentstehungsprozess erzeugen beispielsweise durch Herstellung mehrerer Prototypen-Spritzgusswerkzeuge hohe Kosten, die mithilfe der additiven Fertigung oft deutlich reduziert werden können. Neben dem Kostenaspekt tritt häufig auch die Geschwindigkeit bei der Produktentstehung oder Produktmodifikation in den Vordergrund: gestiegene Anforderungen der Konsumenten erfordern eine schnelle Kommerzialisierung von Produkten. Drittens können durch Gewichtsverringerung von Bauteilen häufig große Einsparungen bei der Produktverwendung erzielt werden, insbesondere im Luftfahrt- und Automobilsektor, die ja traditionell an Ressourceneffizienz ein hohes Interesse haben.

### 3. Anforderungen und Anwendungsbeispiele beim Laser Sintern

Wie unter Punkt 1 beschrieben, eignet sich das Laser Sinter-Verfahren besonders gut, um Funktionsbauteile und nicht „nur“ Prototypen zu erzeugen. Ohne die Anforderungen an Muster und Prototypen schmälern zu wollen, so sind die zu erfüllenden Voraussetzungen für den (Vor-)Serieneinsatz deutlich vielschichtiger. Beim **Entwurfsmuster** oder **Anschauungsprototyp** sind die Maßhaltigkeit und die Festigkeit meist noch kein wichtiges Kriterium, wohingegen beim **Konzeptprototyp** und **Funktionsprototyp** eben diese Eigenschaften üblicherweise gefordert sind. Spätestens in der **Vorserie**, **Nullserie** und dann **Serie** kommen dann Anforderungen wie „Reproduzierbarkeit“ und „Null-Fehler-Toleranz“ hinzu, die bisher alle Additiven Fertigungsverfahren quasi disqualifizierten. Auch die Nutzung der Laser Sinter Technologie für Serienbauteile stellt aktuell noch eine Nische dar und bedurfte viele Jahre der Entwicklung und Prozessabsicherung, sowohl auf Maschinenhersteller-, als auch auf Anwenderseite. Diese Entwicklung wurde in den letzten Jahren besonders stark im Bereich der Metall-LS-Technologie getrieben, zeigt sich aber nun auch immer mehr im Bereich des Kunststoff Laser Sinterns. Die zunehmende Kenntnis bzw. Statistik über entstehende Bauteileigenschaften trägt dazu bei, dass sich mehr und mehr Endanwender mit der Option „Additive Fertigung“ beschäftigen und erste Projekte zusammen mit Dienstleistern oder sogar innerbetrieblich realisieren. Beispielsweise die Tatsache, dass E-Modul und Zugfestigkeit im Vergleich zum Spritzguss fast identisch sind, ist bisher nur unzureichend bekannt und wird in den kommenden Jahren die Nutzung dieser Technologie weiter beflügeln.

Auf zwei Anwendungen möchte ich in diesem Zusammenhang intensiver eingehen, da sie die Vorteile der additiven Fertigung eindrucksvoll nutzen: eine **pneumatische** und eine **mechanische Greifereinheit** zur Manipulation rotationssymmetrischer Körper, zum Beispiel Flaschen. Bei dem pneumatischen Greifer, dem sog. **Bronchialgreifer** der Firma Kuhn-Stoff GmbH & Co KG [5], lag das Hauptaugenmerk auf der Reduzierung des Gewichtes und damit einer Reduzierung zu bewegender Massen. Sekundär wurden einer Verringerung der Herstellzeit und -kosten und eine erhöhte Flexibilität bei der Umrüstung gefordert. Die bis dato zum Einsatz gekommene Lösung bestand aus 21 Einzelteilen, von denen mehrere aufwändige Frästeile waren. Die Bronchialgreifereinheit bestand letztlich aus fünf Einzelteilen, von denen eines die Trägerplatte und die verbleibenden vier die Werkstückaufnahmen waren. Somit konnte das Gewicht von über 1500g auf 220g um 86% gesenkt werden. Außerdem verkürzte sich die Herstellzeit der individuellen Greiferlösung von zwölf auf drei Tage. Als großen Vorteil stellte sich im Gebrauch auch die deutlich reduzierte Fehleranfälligkeit heraus: die Pneumatikverschlauchung bei dem konventionellen Greifer war anfällig und erforderte vergleichsweise lange (Um-)Rüstzeiten – beim Bronchialgreifer mussten nur neue Werk-



stückaufnahmen aufgeschraubt werden (ohne jegliche Pneumatikschläuche, da die Druckluftführung durch innenliegende Kanäle erfolgt). Langzeittests wurden nach fünf Mio. Zyklen ohne Versagen abgebrochen, da dies der vom Kunden geforderten Lebensdauer der Greiferlösung entsprach.

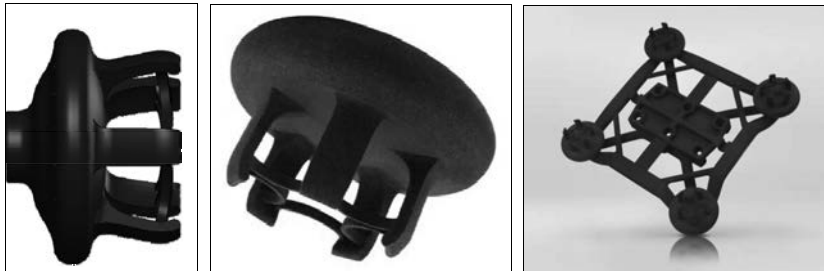


Bild 1: Von links nach rechts: Rendering aus CAD-Daten, Laser gesinterter und nachträglich gefärbter Bronchialgreifer, montierte Greifereinheit

Die **mechanische Greiferlösung** der Firma ANUBIS 3D [6] entstand durch die Beauftragung eines Kunden, eine flexible Greifereinheit zu entwickeln, die zuverlässig jede Flaschenhalsform problemlos greifen kann. Dazu sollte der Umrüstaufwand bei Flaschenwechsel so minimal wie möglich sein und externe Aggregate, wie die bisher im Einsatz befindliche Vakuumpumpe, möglichst vermieden werden. Mit der existierenden Lösung kam es immer wieder zu Flaschendeformationen (und dadurch austretender Flüssigkeit), herabfallenden Flaschen und manche Flaschenhalsgeometrien konnten grundsätzlich nicht manipuliert werden. Gelöst wurden diese Anforderungen durch eine komplette Umkonstruktion der bisherigen Lösung, weg von der Vakuumisierung des Kopfraumes (siehe Bild 2, links), hin zu einer rotativen mechanischen Greifbewegung. Dadurch entfiel die Notwendigkeit der externen Vakuumpumpe, die sowohl einen erheblichen Geräuschpegel als auch Stromverbrauch aufwies. Des Weiteren wurden die einzelnen Module durch Zahnstangen in Reihe zusammenschaltbar konstruiert, so dass in der Fertigung flexibel und schnell umgerüstet werden konnte. Das Gewicht konnte von 3850g auf 624g um 84% gesenkt werden. Die Herstellkosten für beide Lösungen sind mit knapp unter 100€ pro einzelner Greifeinheit vergleichbar, jedoch konnte die Lieferzeit von mehreren Wochen auf vier Tage ab Auftragseingang gesenkt werden, was dem Endkunden einen erheblichen Vorteil bietet (der Dienstleister erhält von dem Endkunden nur noch Flaschenmuster und innerhalb von vier Tagen liegt das dazugehörige Greifermodul zum Einsatz vor). Die nachträgliche Farbcodierung ordnet den jeweiligen Greifer eindeutig einer Flaschengeometrie zu und verhindert somit Verwechslungen.



Bild 2: Von links nach rechts: Konventionelle Flaschengreiferlösung, Laser gesintertes und nachträglich gefärbtes Greifermodul, montierte Greifereinheit

#### 4. Ausblick: Hürden und Lösungsansätze

Das Laser Sintern von Kunststoffen etabliert sich aktuell zunehmend als komplementäre Fertigungstechnologie von Vorserien- und Serienbauteilen. Die Anforderungen von Firmen, die bisher über viele Jahrzehnte entwickelte Fertigungstechnologien einsetzen, sind jedoch sehr hoch. Lösungslieferanten wie die Firma EOS GmbH sind nun, auch mittels Industriekooperationen, in der Pflicht, bei zukünftigen Kunden existierende Vorbehalte aufzulösen und damit den Einsatz dieser Technologie zu ebnen. Besonderes Augenmerk verdienen hierbei die Produktivitätssteigerung der Anlagen und somit die Maximierung der Gesamt-Anlageneffizienz, Bereitstellung von Nachbearbeitungsmethoden für Laser Sinter Bauteile und die Erfüllung weiterer Anforderungen aus dem Bereich der industriellen Fertigung, wie z.B. die Einhaltung von Maßhaltigkeitsnormen und Prozesskennzahlen.

Der zunehmende Wettbewerb im Umfeld der Additiven Fertigung durch Laser Sintern, beispielsweise durch Firmen wie Prodways, Ricoh und Hewlett Packard, zeigen, dass dieser Technologie vieles zugetraut wird. Die Chancen stehen nicht schlecht, dass sich Laser Sintern in der Zukunft als ein Standardfertigungsverfahren für komplexe und funktionsintegrierte Serienbauteile etabliert. Die EOS GmbH wird als aktuell führendes Unternehmen in diesem Bereich weiterhin alles dafür tun, dass sich der technologische Reifegrad weiter erhöht und sich die Additive Fertigung damit auf der Agenda vieler zusätzlicher Entscheider wiederfindet.

- [1] Hierzu eine Vielzahl von Quellen im Internet verfügbar. Aktuellstes Werk hierzu: M. Schmid, Selektives Lasersintern (SLS) mit Kunststoffen, ISBN 978-3-446-44562-8, Carl Hanser Verlag München, 2015, Seite 8
- [2] Download unter: <http://www.economist.com/node/21552901>
- [3] Download unter: <http://www.gartner.com/newsroom/id/3114217>
- [4] Download unter: [https://www.zukunftsinstitut.de/fileadmin/user\\_upload/Megatrend\\_Doku/Megatrend\\_Map\\_480x340.png](https://www.zukunftsinstitut.de/fileadmin/user_upload/Megatrend_Doku/Megatrend_Map_480x340.png)
- [5] Ein Kooperationsprojekt der Firmen Kuhn-Stoff GmbH & Co KG (Internet: [www.kuhnstoff.de](http://www.kuhnstoff.de)) und der Wittmann Gruppe (Internet: [www.wittmann-group.com](http://www.wittmann-group.com))
- [6] ANUBIS 3D, ein Geschäftsbereich der Firma "Anubis Manufacturing Consultants Corporation", Kanada (Internet: [www.anubis3d.com](http://www.anubis3d.com))



# Möglichkeiten und Grenzen der 3D-Drucker für Kleinserien – Ist das Unmögliche bereits möglich?

**J. Kasemann, Coffee Solution GmbH, Krailling**

## Kurzfassung

Es gibt zahlreiche Einsatzmöglichkeiten für 3D Druck, die weit über Rapid Prototyping hinausgehen. Die Diskussion, ob 3D Druck in Konkurrenz zum klassischen Spritzgießen steht, ist fast verstummt. Additive Fertigung wird das Spritzgießen nicht ersetzen, aber, unter den richtigen Voraussetzungen, eine ideale Ergänzung und eine kostengünstige Fertigungsoption darstellen.

Additive Fertigung und Spritzgießen lassen sich perfekt miteinander verbinden, indem Werkzeugeinsätze mit dem 3D Drucker gefertigt und zum Spritzgießen genutzt werden.

Kleinserien lassen sich problemlos mit dem SLS Verfahren (Selektives Lasersintern) herstellen.

## 1. Drucken mit neuen Werkstoffen: Glasfaser, Karbon, Kevlar

Werkzeuge und Vorrichtungen können häufig nur bedingt additiv gefertigt werden, weil meistens nicht die benötigte Festigkeit erreicht wird. Jetzt wird abriebfestes Nylon mit Glasfaser, Kevlar oder Karbon verbunden und kann damit ein besseres Festigkeits-Gewicht erreichen als Aluminium.

## 2. Bauteile in Spritzgießqualität aus dem 3D Drucker

Technologien, die flüssige Materialien verarbeiten, machen es möglich, dass Bauteile in Spritzgießqualität 3D gedruckt werden können. Präzise Funktionsteile können schnell und kostengünstig gefertigt werden. Anwender haben die Möglichkeit, ihre Ideen frühzeitig zu testen, Konstruktionsfehler zu erkennen bzw. zu vermeiden und die Zeit von der Idee zur Serie erheblich zu verkürzen.

## 3. 3D Druck von Werkzeugeinsätzen

Alternativ zu additiv gefertigten Kunststoffteilen ist es auch möglich, Werkzeugeinsätze additiv herzustellen. Dazu eignen sich besonders die MultiJet Printing Technologie oder die Stereolithografie. Für die folgenden Einsatzbereiche sind additiv gefertigte Werkzeugeinsätze beson-

ders geeignet: Prototyping, DFM (Design for Manufacturing), digitale Inventarisierung sowie für die Fertigung von Kleinserien und Musterteilen. Additiv gefertigte Werkzeugeinsätze halten sogar einer Einspritztemperatur von 350°C stand. Somit können auch alle spritzgießbaren Thermoplaste verarbeitet werden. Zahlreiche Anwender haben bereits in folgenden Materialien erfolgreich Bauteile gegossen: Elastomere, Polypropylen, Polyethylen, Styrol, Polycarbonate und Flüssigkristallpolymer.

#### **4. 3D Druck für Kleinserien – das Unmögliche wird möglich!**

Mittels des Selektiven Lasersinterns können Teile produziert werden, welche die gleiche Qualität aufweisen wie Spritzgussteile. An dieser Stelle ist es nicht übertrieben zu sagen: SLS verändert die Produktion! Die Vorteile sind einfach immens: komplette Designfreiheit, hohe mechanische Belastbarkeit, hohe Wiederholgenauigkeit und vielfältige Fertigungsmöglichkeiten und zudem sind keine weiteren Werkzeuge notwendig.

# Smart / dekorativ / funktional – Maßgeschneiderte FIM Oberflächen

Dipl.-Ing. **D. Lange**,  
BÖ-LA Siebdrucktechnik GmbH, Radevormwald

## WERK 1 - TECHNOLOGIEN

**BÖ-LA Siebdrucktechnik** ist eine der größten technischen Siebdruckereien Europas. Wir produzieren mit hochmodernen Siebdruckanlagen unter kontrollierten Fertigungsbedingungen.

- Siebdruck
- Tampondruck
- Digitaldruck
- Vollautomatisierte und kameragesteuerte Stanztechnik
- Laser-Schneiden
- Bandstahlschnitt
- Heißprägung
- Entwicklung homogener Ausleuchtung hinterleuchteter Folien

## WERK 2 - TECHNOLOGIEN

**BÖ-LA Kunststofftechnik** verfügt über Verform- und Spritzgussmaschinen der neusten technischen Generation.

- Hinter- oder Vorspritzung von Siebdruckfolien im FILM-INSERT-MOLDING Prozess (FIM)
- Mehrkomponenten Spritzguss
- Mechanische Verformung
- Hochdruck-Verformung
- Stanzen von 3D-Geometrien
- Ultraschallverschweißen und Heißverstemmen
- Lackieren (mit Partnern)
- Laseretching (mit Partnern)
- Galvanisierung (mit Partnern)

## WERK 3/ BAUGRUPPENMONTAGE

### **BÖ-LA's neues Endkontroll-, Montage- und Logistikzentrum**

- Weitere 2.400 qm Produktions- und Lagerfläche
  - Endkontrolle
  - Zentrallager
  - Baugruppenmontage
- Angebunden an Werk 1 mittels Verbindungsbrücke und Lastenaufzug

### **Vom Spezialisten für Foliendekoration zum Lieferanten dekorativer Baugruppen**

In 10 automatisierten Prozessschritten inklusive In-line Kameraprüfung, entsteht eine dekorative Baugruppe aus folgenden Bauteilen:

- 3D-verformte Dekorblende in Piano Black mit Hardcoat
- Mattlackrahmen
- diverse Lichtleiter
- Reflektor
- Chromrahmen



## GESCHÄFTSBEREICHE

<b>Automobil</b>					
	Heizungs-/Lüftungs- Bedienfelder und Baugruppen	Audio-/Multimedia- Frontpanels	2D/3D Zifferblätter mit 3D-Logo- Applikationen	Hinterleuchtete Bedienelemente und dekorierte Gang- wahlschalter	Interieur Zierleisten mit Ambiente- beleuchtung
<b>Hausgeräte</b>					
	Kühlschrank Bedienkonsole	selbstklebende Bedienfolien	Frontpanels Geschirrspüler	Plexiglasabdeckungen für Waschmaschinen- displays	Waschmaschinen- blenden
<b>Elektronik</b>					
	Gebäudetechnik Wandradio	Medizintechnik Bedienterminal	Medizintechnik Blutdruckmessgerät	Solarindustrie Bedienpanel	Gebäudetechnik Turkkommunikation

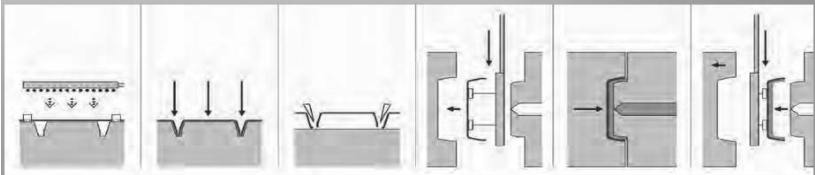
## DER FIM-PROZESSABLAUF

Ein modernes und multifunktionales Dekorationsverfahren

- Prozessschritte:
1. Siebdruck
  2. Stanzen
  3. Verformung
  4. Stanzen
  5. FIM Spritzguss

**FIM = Film-Insert-Molding**

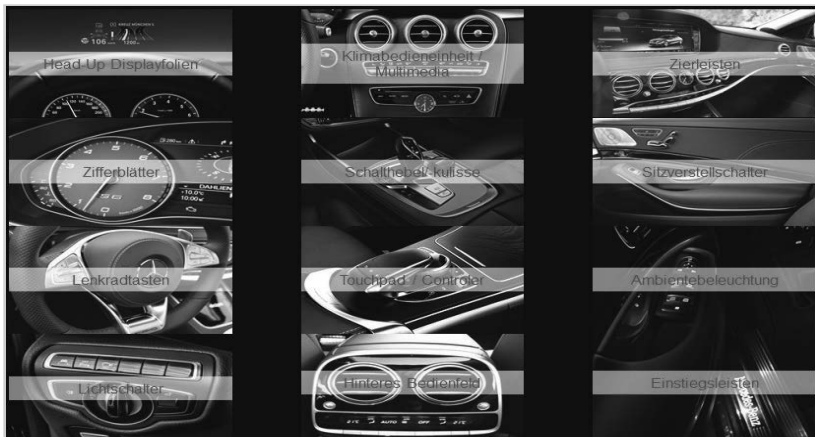
Prozessverfahren der FIM Technologie:



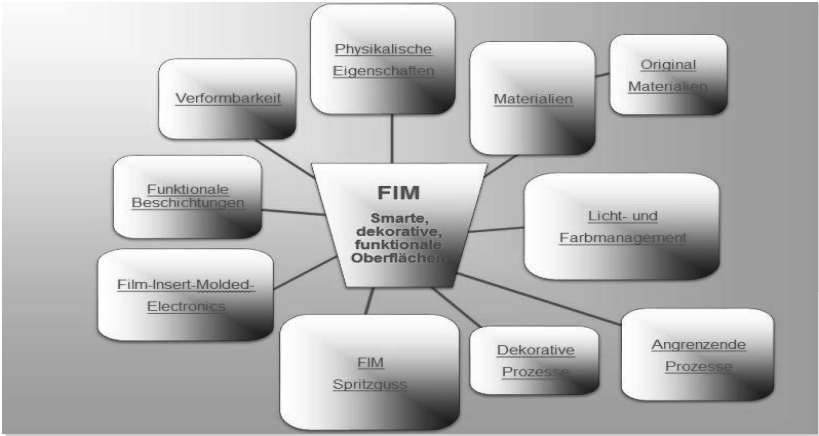
## FIM DEKORATIONSMÖGLICHKEITEN



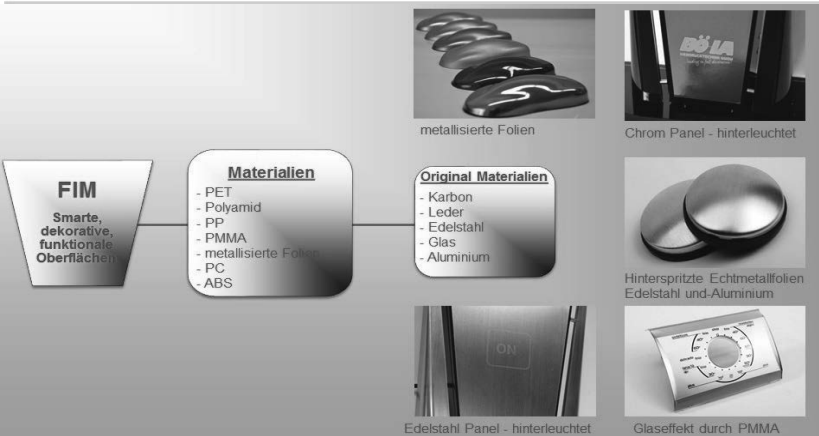
## FIM ANWENDUNGSFELDER IM AUTOMOTIVEN INTERIEUR



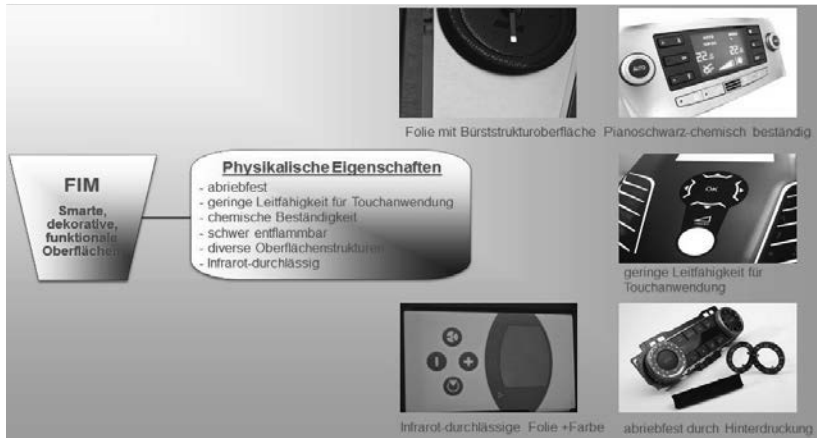
# FIM-BAUKASTEN



# FIM-BAUKASTEN



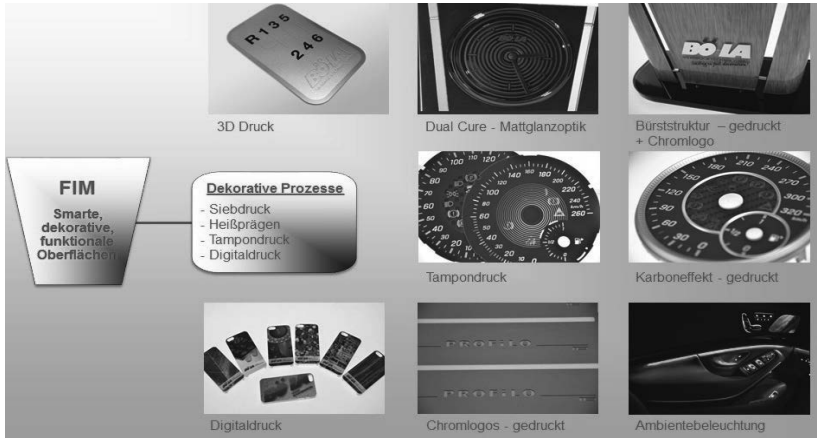
## FIM-BAUKASTEN



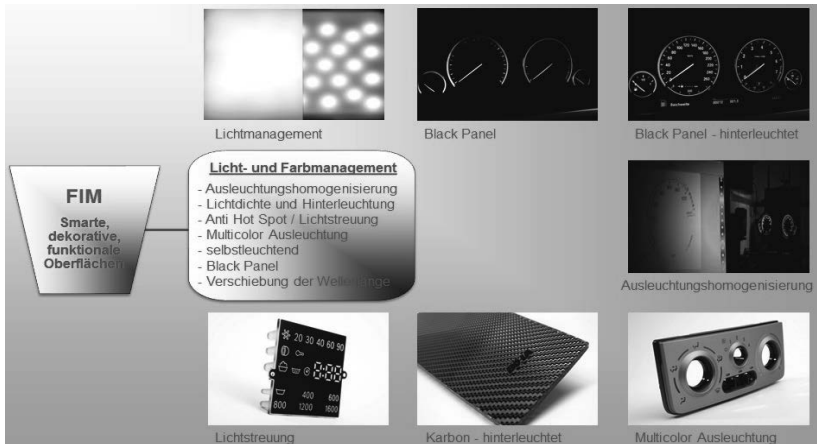
## FIM-BAUKASTEN



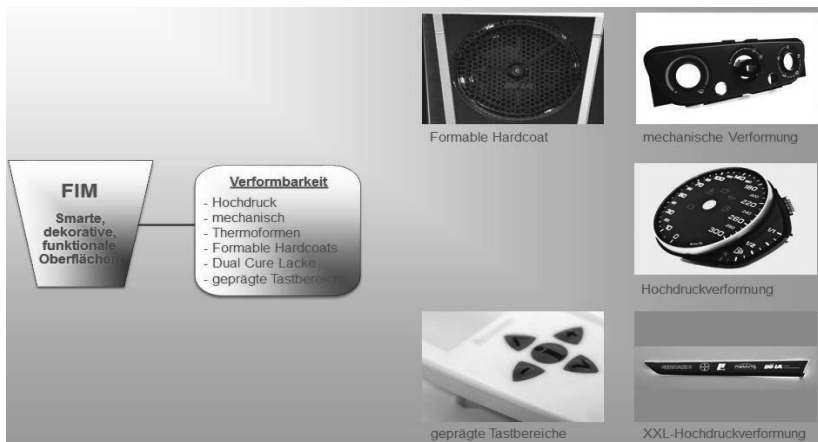
## FIM-BAUKASTEN



## FIM-BAUKASTEN



## FIM-BAUKASTEN



## FIM-BAUKASTEN



## FIM-BAUKASTEN



Touchsensors (touchskin)



Touchscreen (e-bee)



FIM-O OLED Bauteil selbstleuchtend



**FIM**  
Smarte,  
dekorative,  
funktionale  
Oberflächen

Film-Insert-Molded-Electronics

- Gestenkontrolle
- Touchsensoren
- FIM-OLED
- Dichromatik
- gedruckte Elektronik: Leiterbahnen, Antennen
- LED Zuleitungen, Touchscreensensoren



Dichromatik



gedruckte Elektronik




2D-Sensitive-Touch BO-LA Wecker - 1. Generation




3D-Sensitive-Touch BO-LA mp3 Wecker - 2. Generation


## FIM-BAUKASTEN




Feinmontage Mikrospritzguss Logos



Mattlack - gelasert




Galvano Chromringe




**FIM**  
Smarte,  
dekorative,  
funktionale  
Oberflächen

Angrenzende Prozesse


- Montage
- Lackieren - Lasern
- Galvanisieren
- Ultraschallverschweißen
- Heißverstemmen
- Heißprägen
- Kaschieren - Laminieren
- Kratzschutzlackierung
- In-Mold-Decoration (IMD)




Heißverstemmen - Chromringe



Heißprägung



Ultraschallverschweißen



automatisierte Montagelinie

## MAßGESCHNEIDERTE FIM ANWENDUNG

### Elemente aus dem FIM Baukasten:



- ✓ Siebdruck
- ✓ Multicolorausleuchtung
- ✓ Ausleuchtungshomogenisierung
- ✓ 3D Hochdruck-Verformung
- ✓ Formable Hardcoat – chemisch beständig
- ✓ Klavierlackoberfläche – kratzfest
- ✓ 2-Komponenten FIM Spritzguss
- ✓ Mattlack – gelasert
- ✓ Galvanisieren
- ✓ Montagetechnik



## MAßGESCHNEIDERTE FIM ANWENDUNG

### Elemente aus dem FIM Baukasten:



- ✓ Siebdruck
- ✓ Ausleuchtungshomogenisierung
- ✓ 3D Hochdruck-Verformung
- ✓ Hinterspritzung
- ✓ versiegelte Oberfläche – seamless Design
- ✓ UV-geschützt gegen Vergilbung





## MAßGESCHNEIDERTE FIM ANWENDUNG



### Elemente aus dem IM Baukasten

- ✓ Siebdruck
- ✓ Piano Black Oberfläche
- ✓ Black Panel mit Fading Effekt
- ✓ Ambientebeleuchtung
- ✓ XXL 3D Hochdruck-Verformung
- ✓ Formable Hardcoat – kratzfest
- ✓ Hinterspritzung
- ✓ Galvanisierter Chromrahmen



## MAßGESCHNEIDERTE FIM ANWENDUNG

### Elemente aus dem FIM Baukasten:

- ✓ Siebdruck
- ✓ Hinterleuchtung
- ✓ Hinterspritzung
- ✓ Touchsensorik
- ✓ Ultraschallverschweißen
- ✓ Montagetechnik



© BÖ-LA SIEBDRUCKTECHNIK GMBH



© BÖ-LA SIEBDRUCKTECHNIK GMBH

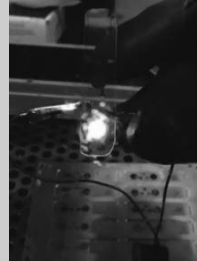


## OLED TECHNOLOGIE - VORTEILE

- Integration von Licht & Dekor in nur einem Schuss
- Dünne Gesamtdicke:
  - Sehr dünne organische Schicht
  - Kein physisches Bauteil wie eine LED
  - Keine Montageplatte oder Lichtleiter
- Sehr gleichmäßige Ausleuchtung, geeignet als Flächenleuchte, keine Notwendigkeit des Ausgleichs
- Erstellung von selbstleuchtenden Teilen
- Niedrige Betriebsspannung (2-6 Volt)

### Herausforderungen:

- Verkapselung
- Prozessabstimmung während des Formens und Spritzens
- Kontaktierung der OLED
- Verarbeitung der organischen Schicht



## OLED TECHNOLOGIE

### Eckdaten:

- |                |   |
|----------------|---|
| ➤ Lebensdauer  | 20.000 Stunden                            |
| ➤ Helligkeit:  | 1.000 Cd/m² mit 4,5 Volt                  |
| ➤ OLED Farben: | gelb, orange, rot, grün (wurden getestet) |

### OLED Verarbeitungsbedingungen:

- |                         |                  |
|-------------------------|------------------|
| ➤ Pressdruck:           | ungefähr 600 bar |
| ➤ Spritzgießtemperatur: | ungefähr 200° C  |
- Die OLED ist während des Verformens starken Scherkräften ausgesetzt



## 3D SENSITIVE TOUCH – INNOVATION VON © BÖ-LA SIEBDRUCKTECHNIK GMBH



BÖ-LA mp3 Alarm Uhr 2014

### BÖ-LA's 3D Sensitive Touch

Unsere neue kapazitive Sensortechnologie für 3D geformte Bauteile mit berührungsempfindlichen Oberflächen, die von der Rückseite aus beleuchtetbar sind (Hintergrundbeleuchtung)

## 3D SENSITIVE TOUCH



- ✓ Echte 3D-geformte Oberflächen
- ✓ Komplexe Bauteilgeometrien zulässig
- ✓ Dekoration und Funktion in einer Folie integriert – keine Verwendung einer Dekorfolie sowie einer technischen Folie notwendig
- ✓ Gleichzeitige Verformung und Verspritzung der Folie mit Dekor und gedruckte Leiterbahnen
- ✓ Mit allen gängigen Folientypen und Oberflächen (Hardcoat, Mattglanz, Entspiegelt, Softtouch, etc.) kompatibel
- ✓ Mit speziellen Siebdruckfarben kombinierbar, die für Dekoration und Lichtdichte unerlässlich sind
- ✓ Seamless-Design mit geschlossener Oberfläche möglich
- ✓ 3D-Sensitive-Touch kann voll in den FIM- Prozess integriert werden

## MULITDEKOR KONZEPT 2015



### 3D-Sensitive-Touch

in Kombination mit:

- Piano Black / White
- fotorealistischem Digitaldruck
- Chrom Panel
- Softtouch
- mattem Hardcoat
- Antiglare



## 3D SENSITIVE TOUCH 2015



Chrom Panel



Piano White / Piano Black



Digitaldruck



Antiglare / Antirefektiv / Antifingerprint

## 3D FIM DISPLAY SOLUTIONS

**MESSENEUHEIT**



### BÖ-LA's 3D-FIM-Display-Solutions

bieten neue Möglichkeiten der Integration von TFT Displays in 3D geformte FIM Oberflächen.

Neuartige Folien Generationen ermöglichen ablesbare Display-Applikationen im Seamless-Design.

Verfügbare Folienoberflächen:

- Antiglare
- Antirefektiv
- Matt
- Antifingerprint

## REINRAUM DRUCKEREI

Um die Druckerei auf die Produktion von gedruckter Elektronik vorzubereiten, wurde die gesamte Druckerei zu einem 2.500 qm großen Reinraum gekapselt.

- Luftbefeuchtungssystem
- Klimaanlage
- Überdruck
- Zugangskontrolle
- Reinraumkleidung
- UV-freie LED-Beleuchtung



## REINRAUM PRODUKTIONSZELLEN

BÖ-LA's Reinraum-Fertigungszellen zeichnen sich durch einen hohen Automatisierungsgrad aus:

- 3-Achs-NC-Handling oder 6-Achs-Roboter-Systeme
- Automatisiertes Zufuhr-/ Fördersystem
- Ein- oder Zweikomponenten Spritzguss
- In-line Reinigungssystem
- In-line Abtrennung des Angusses
- In-line Videokontrolle







# Füllsimulation beim Mikrospritzgießen – Praktische Aspekte

Dr.-Ing. **G. Jüttner**, Dipl.-Wi.-Ing. **C. Löser**,  
Kunststoff-Zentrum in Leipzig gGmbH, Leipzig

## 1 Einleitung und Motivation

Spritzgegossene Mikroformteile sind eindeutig im Praxiseinsatz angekommen und werden in miniaturisierten Anwendungen als Optik-, Elektronikkomponente oder mechanische Elemente bspw. der Automobil-, Medizin- und Nachrichtentechnik eingesetzt. Bei Formteilen, bei denen Abschätzung von Machbarkeit und technischen Risiken besonders schwer ist, könnte die Spritzgieß-Simulation besonders hilfreich sein, wenn es nicht die Unsicherheiten auf diesem Gebiet geben würde.

Für die praxisingerechte Simulation des Mikrospritzgießprozess gelten die Unsicherheiten bezüglich des Aufwandes (Preis, Zeit) im Verhältnis zu Nutzen und Zuverlässigkeit der gewonnenen Ergebnisse. Zudem ist auch die Praxis gefordert: Die Randbedingungen der Simulation müssen den realen Vorgang abbilden, der wiederum transparent, steuerbar und reproduzierbar sein muss.

Im Folgenden werden nach einer kurzen Zusammenfassung zu den Besonderheiten bei der Mikro-Füllsimulation in der Praxis bewährte Vorgehensweisen gezeigt und die verallgemeinbaren Erkenntnisse anhand von Fallbeispielen herausgearbeitet. Die dargestellten Formteile sind hauptsächlich für die Mikrospritzgießmaschine formicaPlast ausgelegt, lediglich in Kap. 3.4 werden die Zusammenhänge von speziell für eine Schneckenkolben-Spritzgießmaschine konzipierten Angüssen erforscht. Die Verwendung der formicaPlast Mikrospritzgießmaschine ist für die im folgenden dargestellten Untersuchungen und im Allgemeinen für das Spritzgießen von Mikroformteilen mit wenigen Kubikmillimeter Volumen besonders geeignet. Die verweilzeitoptimierte Spritzeinheit erlaubt minimalste Schussgewichte, wodurch erstmalig ausgewogene Anguss-Formteil-Verhältnisse und damit die technologische Kontrolle über die Formfüllphase möglich wird. Der kleindimensionierte Einspritzkolben ( $\varnothing 3$  mm) ermöglicht eine hohe Einspritzgenauigkeit und einspritzweggesteuerte Füllstudien auch für Mikroformteile [1, 2].

## 2 Besonderheiten der Mikrospritzgieß-Füllsimulation

Die Ungenauigkeit der Simulationsergebnisse ist verschiedentlich, beispielsweise anhand von Füllbildern und Druckverlusten [3] nachgewiesen. Die Ursachen sind (ohne wertende Reihenfolge):

- In [4] wird die fehlende Genauigkeit oder die nicht praxisgerechte Ermittlung der Materialdaten genannt. Konkret wird beispielsweise die Praxisferne der verwendeten Abkühlraten bei der Ermittlung der pvT-Werte [9, 10] oder die Vernachlässigung des rheologischen Verhaltens bei hohen Schergeschwindigkeiten [11] genannt.
- Unsicherheiten bei dem generierten FE-Netz. In [5] wird für ein Mikroformteil ohne Mikrostrukturen die Methode verwendet, das Netz so lange zu verfeinern, bis die Druckwerte gitterunabhängig sind. In [12] wiederum, wo ein Rechteckkanal mit Mikrostrukturen versehen ist (s. Kap. 3.5), werden die besten Ergebnisse mit programminternen generierten Netzen verbunden mit einer Kantenlänge der Elemente von 0,25 mm erzielt.
- Nichtübereinstimmung der Randbedingungen mit der Praxis. Am deutlichsten ist es anhand der Vorgabe des Einspritzvolumenstroms nachvollziehbar. So werden meist trotz hoher Einspritzgeschwindigkeiten und sehr kurzen Einspritzwegen weder Beschleunigungsphase der Schnecke noch das Schließverhalten der Rückstromsperre berücksichtigt. Eine Fehleinschätzung der Einspritzdynamik resultiert zusätzlich daraus, dass die Kompressibilität der Schmelze im Schneckenorraum und im Anguss unberücksichtigt bleibt ([5], s. dazu Beispiele später).
- Nicht ausreichend präzise Formulierung der erforderlichen, vor allem thermischen Randbedingungen [5, 6], obwohl mit zunehmendem Miniaturisierungsgrad der Einfluss der thermischen Verhältnisse an den Rändern auf das Füll- und Erstarrungsverhalten zunimmt. Grund ist die Zunahme des Oberfläche-Volumen-Verhältnisses des Formteils (s. dazu Beispiele später).
- Wandgleitung durch hohe Schubspannungen.
- eher bei niedrigviskosen Substanzen können dimensionale Effekte wie die Kapillarwirkung und "dimensionsabhängige Viskosität" eine Rolle spielen [5, 7]

## 3 Fallbeispiele

### 3.1 Füllbild für eine Bumpmatte

Im ersten Beispiel dient die Füllsimulation als Designunterstützung bei der Entwicklung einer Bumpmatte. Der Hintergrund dieser Anwendung ist, dass die thermomechanische Ermüdung der Lötverbindungen an flächig verteilten Kontakten von mikroelektronischen Bauelementen (BGA, CSP, FC) Probleme bereitet. Es bietet sich an, die in den einzelnen Lotkontakten in-

duzierten mechanischen Spannungen durch eine Polymerummantelung in Form von Polymer-Hohlzylindern zu minimieren [13].

Da einzelne Zylinder in der Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT) nicht händelbar sind, müssen die Hohlzylinder zu Polymerzylinder(bump)matten verbunden sein. Um die thermisch induzierten Verschiebungen möglichst wenig fortzupflanzen, werden elastische Verbindungen benötigt, welche bei der Formfüllung im Spritzgießen auch die Funktion des Angussverteilers übernehmen. Da diese „Angussverteiler“ nicht natürlich ausbalanciert sein können, werden sie mit Hilfe der Füllsimulation optimiert.

Abb. 1 zeigt den CAD-Entwurf und das realisierte Formteil inkl. Anguss. Das Projekt ist für das Dreiplatten-Stammwerkzeug der formicaPlast Mikrospritzgießmaschine ausgelegt. In Abb. 2 sind die Optimierungsschritte zum besseren Füllverhalten dargestellt. Version "2" ist die Grundvariante mit in den Reihen und Spalten gleichmäßig wiederkehrenden T-Verbindungen, welche tangential an den Zylinder anschließen. Bei dieser werden die linke obere und die rechte untere Ecke zuerst gefüllt, gefolgt von der Ecke unten links und mit weiterer Verzögerung diagonal gegenüber. Da für die ungleiche Füllung der letzten beiden Ecken die entsprechend gerichtete T-Verbindung am Anguss verantwortlich zu sein scheint, ist es naheliegend, diese Verbindung wegzulassen (Version "2a"). Dadurch kehren sich allerdings die Verhältnisse um und die Füllzeitdifferenz wird sogar größer. Schließlich führt die Drehung der mittleren Verbindung um 90° zu einer optimalen Füllung. Die ausgewogene Füllung bei möglichst geringen Drücken ist essentiell, die komplexen Mikrostrukturen voll und gleichzeitig gratfrei zu bekommen.

Die Auswertung der Füllzeiten für die einzelnen Ecken ist in Abb. 3 dargestellt. Die ersten drei Werte quantifizieren die oben beschriebenen Erkenntnisse mit der bevorzugten Füllung der Ecke "D" gegenüber "B" (Version "2"), die Umkehrung der Füllreihenfolge der letzten Ecken mit vergrößerten Füllzeitdifferenzen der Version "2a" und schließlich das optimale Ergebnis bei "2b". Über die Verlässlichkeit der Ergebnisse erlaubt diese Optimierungsreihe ohne PraxiscHECK keine Aussage. Die weiteren Werte in der Abb. 3 sind für die Geometrie "2b" mit unterschiedlicher Software und Vernetzungsmethode gerechnet. Es zeichnet sich dabei eine weitgehende Konstanz ab. So sichert, vorsichtig bewertet, eine Variation der Simulationsmethode hinsichtlich Aufbereitung des FE-Netztes und der Auswahl der Software das Ergebnis im Rahmen der theoretischen Möglichkeiten ab.

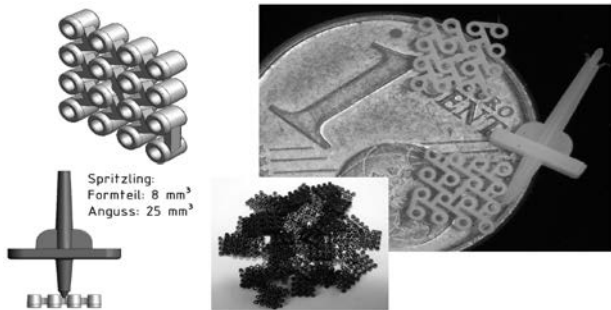


Bild 1: Das Formteil "Bumpmatte" als CAD-Entwurf und als reales, spritzgegossenes Formteil.

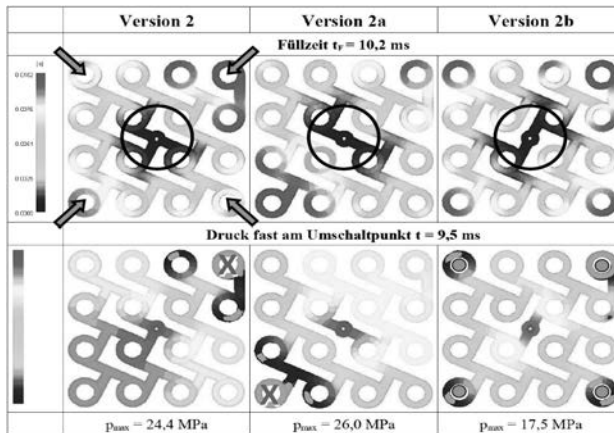


Bild 2: Simulationsergebnisse für das Formteil "Bumpmatte". Fließfrontverlauf und Formfülldruck für unterschiedliche Gestaltungsvarianten im Anschnittbereich.

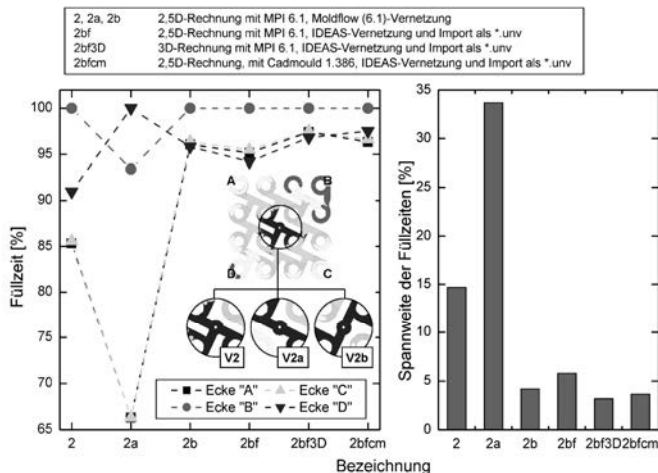


Bild 3: Füllzeitauswertung der Simulationsergebnisse. Links: die Füllzeiten für die einzelnen Ecken in Abhängigkeit von der Geometrie im Anschnittbereich in der Mitte und von der Simulationsmethode. Rechts: die Auswertung der Füllzeitdifferenz der Ecken für dieselben Varianten. Die Varianten: 2, 2a und 2b sind die Etappen der Optimierung mit den unterschiedlichen Geometrien im Anschnittbereich, die weiteren Werte sind Ergebnisse für die Geometrie "2b", mit unterschiedlicher Software und Vernetzungsmethode gerechnet.

### 3.2 Füllbild und Bindenahststellen für ein Mikro-2K-MID-Bauteil

In diesem Beispiel wird die Füllsimulation für ein Zweikomponenten-Mikroformteil auf ähnliche Art und Weise, wie im vorherigen Beispiel zur Designunterstützung praktiziert. Der Softwarevergleich hat jedoch eine andere Vorgehensweise und es ist ein umfangreicher Praxisvergleich zusätzlich möglich und vorhanden.

Es handelt sich um ein Studienobjekt für die 2K-MID-Technik, mit dem Ziel, die Strukturierungsmöglichkeiten zu untersuchen [14] (Abb. 4). Im untersuchten Beispiel stehen die Leiterbahnen erhaben auf dem Vorspritzling aus einem metallisierbarem Kunststoff (LCP Vectra E820i Pd) und werden durch die zweite Komponente durch Auffüllen der Zwischenräume aus nicht metallisierbarem Kunststoff (Isolierschicht, LCP Vectra E130i) voneinander getrennt. Dabei entstehen komplexe Fließfrontverläufe mit zahlreichen Bindenähten.

Komponenten getrennt

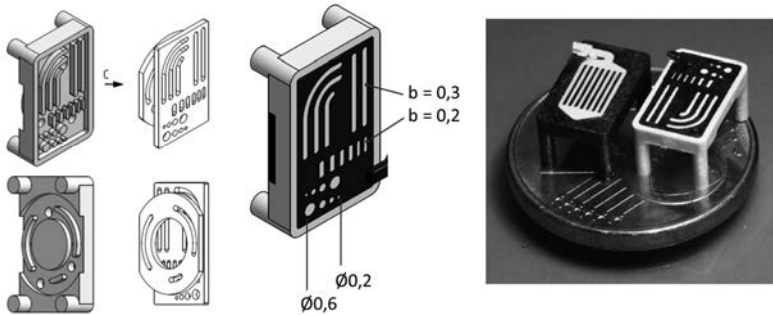


Bild 4: Das Formteil "2K-MID-Demo" als CAD-Modell mit separater Darstellung der zweiten Komponente und als reales Bauteil.

Die erste Studie ist wieder ein reiner Softwarevergleich (Konkret: Cadmould 3D-F (V4.5) und Autodesk Moldflow (V2011)). Als Indikator dienen die bei verschiedenen technologischen Einstellungen entstandenen Bindenahtstellen des Füllbildes. Abb. 5 zeigt eine Übersicht aller Ergebnisse, wobei von der Rückseite die Ergebnisse wegen der gefundenen Temperaturvarianz in einer Spalte zusammengefasst sind. Es ist auffällig, dass die beiden unterschiedlichen Softwareprodukte nur bei den für die Praxis irrelevanten geringen Einspritzgeschwindigkeiten einen signifikanten Unterschied aufweisen. Dies spricht für die Anwendbarkeit der Simulation, wenn die Füllparameter praxisgerecht sind.

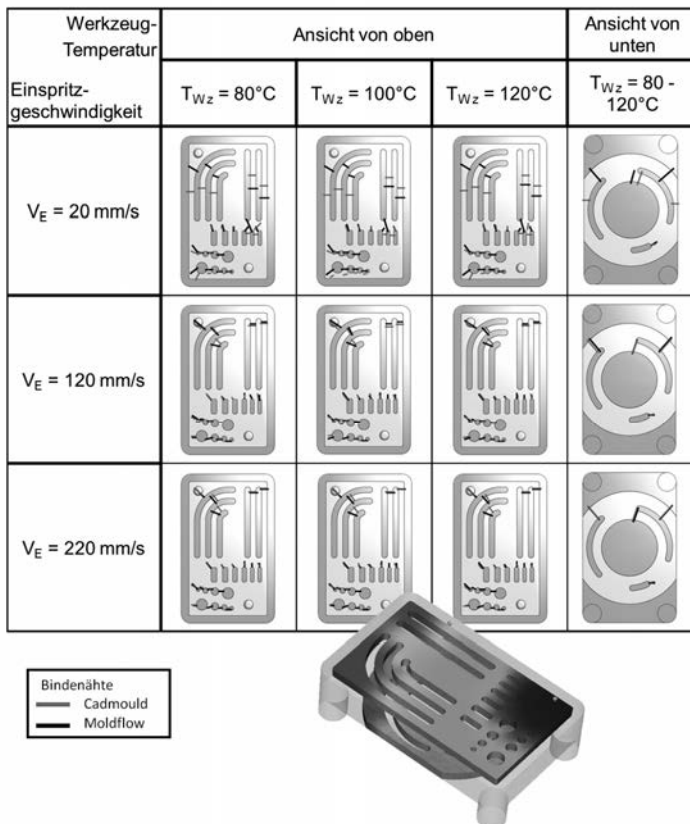


Bild 5: Simulationsergebnisse zum Formteil "2K-MID-Demo": Vergleich der Resultate für die Bindenahtlage zweier Simulationswerkzeuge in Abhängigkeit von der Spritzgießtechnologie.

Diese Aussage wird durch einen Praxisvergleich bekräftigt (Abb. 6). Dieser Vergleich bedingt eine Mikrospritzgießmaschine, welche die Einspritzpräzision besitzt, das Schussvolumen von  $14 \text{ mm}^3$  der zweiten Komponente durch Veränderung des Einspritzweges in feinen Abstufungen zu ändern. Für den verwendeten  $\varnothing 3\text{-mm}$ -Einspritzkolben der formicaPlast Spritzgießmaschine entspricht  $0,1 \text{ mm}$  Kolbenhub  $0,7 \text{ mm}^3$  Schmelzevolumen (Vergleich: für eine  $\varnothing 14 \text{ mm}$  Schnecke sind es  $15 \text{ mm}^3$ ), sodass die gewählte  $0,2\text{-mm}$ -Einspritzwegabstufung der Füllstudie tatsächlich das Schussvolumen abstimmen kann. Zudem bietet der Einspritzan-

trieb genügend Beschleunigung, dass während der Anfahrphase die Schmelze sich nur im Angussbereich befindet und bei der Formfüllung schon in der Simulation gewählte Einspritzgeschwindigkeiten gelten.

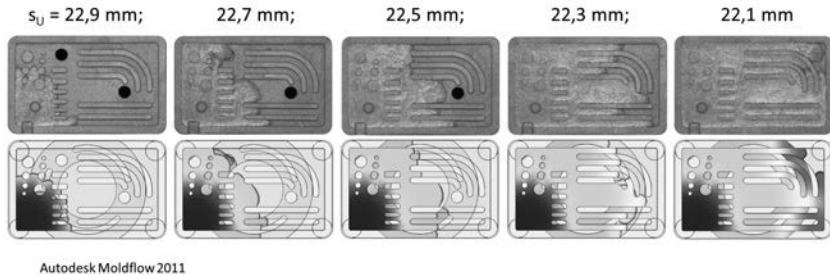


Bild 6: Beispiel aus der Versuchsserie zum Vergleich des Fließfrontverlaufes in der Simulation mit der Praxis.

### 3.3 Fließspirale: Druckbedarf-Vorhersage

Wie eingangs in Kap. 2 erwähnt, ist die präzise Formulierung der erforderlichen, vor allem thermischen Randbedingungen mit zunehmendem Miniaturisierungsgrad besonders wichtig, weil das Verhältnis der Oberfläche zum Volumen des Formteils steigt. Dementsprechend nimmt der Einfluss der thermischen Verhältnisse an den Rändern auf das Füll- und Erstarrungsverhalten zu. Eine Studie der TU Chemnitz und des KuZ [5] weist nach, dass die Auswahl eines geeigneten (integralen) Wärmeübergangskoeffizienten zur Beschreibung des Wärmeübergangsverhaltens zwischen dem Kunststoff und der Werkzeugwand ganz entscheidend für die Qualität der Simulation ist. Verschiedene Autoren haben die für das Spritzgießen generell bedeutsame Fragestellung meist an abstrahierten Labormodellen oder durch theoretischen Berechnungen (s. dazu [5]) untersucht. Im Folgenden wird auf Grundlage von [5] gezeigt, wie durch Reverse Engineering, welches auf den Vergleich von Praxisversuchen mit Simulationen basiert, diese (integralen) Wärmeübergangskoeffizienten ermittelt werden können.

Das Versuchsformteil ist eine Fließspirale, welche am Anschnitt einen Druckaufnehmer besitzt und bei einer festen Breite von 1,5 mm in verschiedenen Wanddicken vorliegt. Das Formteil ist mit seinem Schussgewichtsbereich, Angussgestaltung und Stammwerkzeugkonzept für die Mikrospritzgießmaschine formicaPlast ausgelegt. Somit stehen die gleichen günstigen Bedingungen zur Vergleichbarkeit von Simulation mit der Praxis, wie im vorigen Beispiel zur Verfügung. Der Praxisversuch ist eine Füllstudie, wobei die Füllgrade reprodu-



zierbar über die Einspritzwege gesteuert werden. Die Abb. 7 links zeigt das Formteil mit seinen Abmessungen und die Angussgestaltung. Auf der rechten Seite der Abb. 7 sind ausgewählte Stufen der Füllstudie (oben) und die Reproduzierbarkeit der Druckverläufe (unten) zu sehen.

Um den Praxis-Theorie-Vergleich zu optimieren, wird für diese Untersuchungen die Kompressibilität der Schmelze in allen schmelzeführenden Bereichen mit der Software Moldflow MPI, Ver. 6.1, Rev. 3 modelliert. So erreichen die Volumenströme im Angussbereich weitestgehend Werte, die sich aus der Kolbengeschwindigkeit ergeben. Sobald die Schmelze die Spiralen erreicht, sinken die Volumenströme durch die Komprimierung der Schmelze drastisch und betragen zeitweise weniger als die Hälfte ihrer nominellen Werte. Angesicht des großen Einflusses der Einspritzgeschwindigkeit auf den Wärmeübergangskoeffizienten würde eine Vernachlässigung der Schmelzekomprimierung im Einspritzzylinder nicht nur falsche Ergebnisse bei der Berechnung der Fließfrontbewegung liefern, sondern auch zu einer falschen Abschätzung des Wärmeübergangskoeffizienten führen.

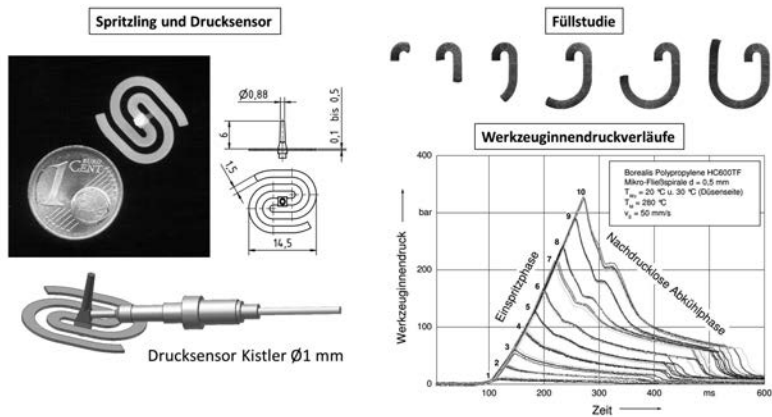


Bild 7: Mikrofließspirale mit Druckmessung. Links: Spritzling und die Lage des Sensors, rechts oben: ausgewählte Stufen einer Formfüllstudie, rechts unten: die Werkzeuginnendruckverläufe zu verschiedenen Füllstufen.

Aus den Druckverläufen können die maximalen Innendrucke ermittelt werden, welche mit dem aus der Vermessung des Formteiles ermittelten Füllgrad kombiniert, die in Abb. 8. den als Punktdiagramm dargestellte Füllgrad-Druck-Zusammenhang ergeben. Diese Zusammenhänge lassen sich auch aus der Füllsimulation ableiten und ergeben unter den aus der Praxis entnommenen Bedingungen bei der Variation des Wärmeübergangskoeffizienten in der

Abb. 8. links dargestellte Kurvenverläufe. Die Reverse-Engineering-Methode bedeutet in diesem Fall, dass derjenige Koeffizient praxisrelevant ist, dessen simulierte Kurve am nächsten zu den praktischen Werten verläuft. Rechts in der Abb. 8 sind die Messwerte und die jeweils am besten geeigneten simulierten Werte für die variierten Geschwindigkeiten bei gleichbleibender Geometrie und thermischen Bedingungen zusammengefasst.

Aus den Diagrammen der Abb. 8 ist ersichtlich, dass

- der Wärmeübergangskoeffizient maßgeblich das Simulationsergebnis beeinflusst.
- sich die Realität durch die Anpassung gut abbilden lässt, dabei variiert aber der Koeffizient stark.
- bei sehr langsamen – und glücklicherweise in der Praxis wenig relevanten – Einspritzgeschwindigkeiten die Methode an ihren Grenzen stößt.

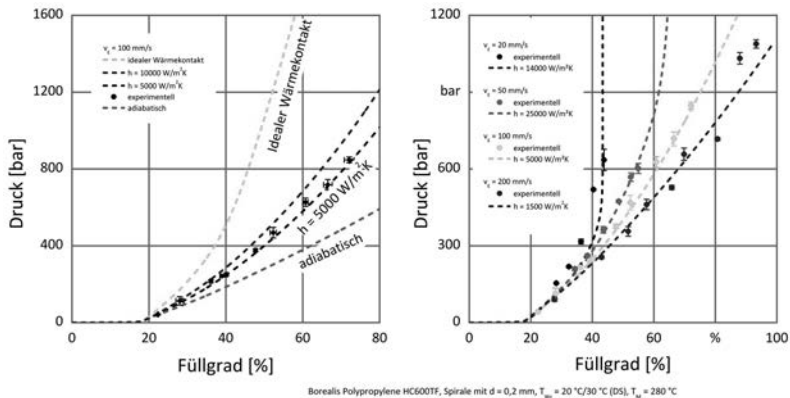


Bild 8: Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten für die Simulation. Links: die Methode als Beispiel, rechts: die Ergebnisse für verschiedene Einspritzgeschwindigkeiten.

Die in [5] dargestellten Untersuchungen deuten an, dass durch die Implementierung einen veränderlichen, druckabhängigen Wärmeübergangskoeffizienten bereits während der Einspritzphase die Simulation verallgemeinert und auch für Grenzfälle deutlich verbessert werden könnte.

### 3.4 Uhrenzeiger: Einfluss der Angussgestaltung, Maschinenauswahl und Maschinen-ein-stellung auf den erreichbaren Füllgrad

Wichtige Aufgabe der Simulation in der Praxis ist, die Füllbarkeit eines Miniatur-, Mikroformteils oder einer Mikrostruktur zu beantworten. Erfahrungsgemäß sind Simulationen auf diesem Gebiet nicht zuverlässig. Zudem kommen unterschiedliche Softwareprodukte trotz identischer Randbedingungen (Netzgeometrie, Materialdaten und technologische Parameter) zu erheblich differierenden Ergebnissen. Als tendenzielle Aussage zur Technologie und zur Vertiefung des Prozessverständnisses sind diese Werkzeuge zweifellos nützlich. Zwei Effekte, welche in den Arbeiten am KUZ oft beobachtet werden, sollen an dieser Stelle nachgezeichnet werden:

- Wir beobachten, dass Formteile mit für Schneckenkolben-Spritzgießmaschinen ausgelegten Angüssen mit großen Angussanteil nicht vollständig gefüllt werden können, während die Füllung mit ausgewogenen Anguss-Formteil-Verhältnis an der schussgewichtsoptimierten Spritzgießmaschine formicaPlast gut möglich ist. Dies ist umso erstaunlicher, da die von der formicaPlast mit 3-mm-Kolben initiierten Volumenströme (Einspritzdynamik) wesentlich unter denen mit einer Schneckenkolbenmaschine mit 14-15 mm Schneckendurchmesser erzielbaren liegt.
- Es sind auch in der Praxis die Auswirkungen der Schmelze im Schneckenvorraum auf die Füllbarkeit vorhanden.

Diese Erfahrungen werden für diesen Beitrag anhand eines fiktiven, an der Praxis angelehnten Formteiles "Uhrenzeiger" nachvollzogen. Das Teil hat praxisgerechte Abmessungen mit geringen Wandstärken, relativ langen Fließwegen bei einem Volumen von  $0,38 \text{ mm}^3$ . Dazu sind in der Abb. 9 die für die formicaPlast und für eine kleine Schneckenkolbenmaschine ausgelegte Spritzlinge zu sehen. Der Anguss für die formicaPlast (im Weiteren "Mikroanguss") kann optimal nach geometrischen/technologischen Gesichtspunkten gestaltet werden, in diesem Fall als 6-fach-Kavität mit einem Schussvolumen von  $8,1 \text{ mm}^3$  und einem Angussanteil von rund 72 %. Für die Schneckenkolbenmaschine spielt die Verweilzeit eine wichtige Rolle. Die Auslegung mit  $351 \text{ mm}^3$  Schussvolumen (im Weiteren "Standardanguss", obwohl über den Standard schon hinausgeht) gilt als gut optimiert und anspruchsvoll [1, 2], bedeutet aber einen Angussanteil von rund 99 %.

•

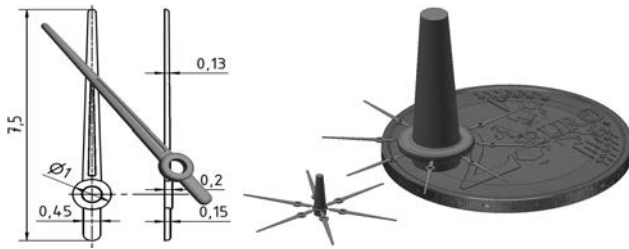


Bild 9: Modellformteil „Uhrenzeiger“ zur Nachbildung von Füllphänomenen. Links: das Formteil, rechts: die Spritzlinge für die Mikrospritzgießmaschine formicaPlast ("Mikroanguss") bzw. für eine kleine Schneckenkolbenmaschine ("Standardanguss") im Vergleich zu einer 2-Euro-Münze.

Es handelt sich um vergleichende Untersuchungen mit identischen Einstellungen für beide Maschinen. Die folgenden Füllsimulationen werden mit technologischen Parametern durchgeführt die im Grenzbereich zur vollständigen Füllung liegen und eine Vergleichbarkeit der sehr unterschiedlichen Maschinenkonzepte erlauben. So sollen die mit Praxisformteilen gesammelten Erfahrungen nachgebildet werden.

Die folgenden Ergebnisse sind aus Rechnungen mit der Software Cadmould 3D-F. Die Formmasse ist PBT Crastin S600F10. Als Grundeinstellung dient sowohl für die Ø15-mm-Schnecke als auch für den Ø3-mm-Kolben eine Einspritzgeschwindigkeit von 50 mm/s bei mittleren Verarbeitungstemperaturen. Beide Parameter werden im Laufe der Simulationsreihe variiert. Das Schmelzevolumen im Spritzzylinder wird ersatzweise durch einen Heißkanalabschnitt nachgebildet. Die Druckbegrenzung liegt bei 2500 bar.

In der Abb. 10 sind die Simulationsergebnisse für die Mikrospritzgießmaschine formicaPlast zusammengestellt. Die einfachste Rechnung ohne pvT-Daten (1), also ohne Berücksichtigung der Kompressibilität der Schmelze, zeigt im Druckverlauf einen deutlichen Knick nach 18 ms beim Erreichen des Anschnittes, welcher jedoch auf den Schmelzestrom keine Auswirkung zeigt. Der Füllgrad steigt weiter linear an. Wird jedoch die Schmelze als kompressibles Medium betrachtet (2), stagniert der Schmelzefluss nach dem Erreichen des Anschnittes und somit bleibt die Dynamik der Füllung auch im weiteren Verlauf geringer. In der dritten Simulationsrechnung (3) der Abb. 10 ist auch die Kompression im Spritzzylinder berücksichtigt. In diesem Fall ist die Stagnation des Schmelzeflusses auch beim Austritt der Schmelze aus der Düse schon zu beobachten, sodass die Füllung des Angusses schon verzögert er-

folgt und die Einspritzdynamik beim weiteren Füllverlauf deutlich gebremst ist. Die Simulation ergibt hier eine unvollständige Füllung. Wenn das Schmelzevolumen im Spritzzylinder reduziert (in diesem Fall durch die Reduktion des Einspritzkolben-Durchmessers von 3 auf 2 mm,) wird und der Volumenstrom beibehalten wird, tritt schon eine Verbesserung ein (4). Zur vollständigen Füllung ist allerdings noch eine weitere Erhöhung des Volumenstromes und der Werkzeugtemperatur notwendig (5).

Wie in Abb. 10 zu sehen, ist das Formteil mit dem Standardanguss unter diesen Bedingungen nicht vollständig füllbar. Da, wie oben erwähnt, absolute Aussagen zur Füllbarkeit problematisch sind, ist die Formulierung "deutlich schwerer als mit Mikroanguss" korrekter. Da beim Standardanguss der Formteilanteil ein knappes Prozent beträgt, ist der eigentliche Formfüllvorgang schwer zu erkennen. Daher ist das Füllgrad-Diagramm mit Achsenunterbrechungen gezeichnet. Kurve (1) steht, wie schon oben, für inkompressible Schmelze, (2) ist die Variante mit pvT-Daten. An dieser Stelle stellt sich natürlich die Frage, welche Einspritzdynamik für die jeweilige Maschinenart und Angussgröße einen objektiven Vergleich bietet. Die gleiche Einspritzgeschwindigkeitsvorgabe bedeutet für die Schneckenmaschine einen 25-fachen Einspritzvolumenstrom, woraus sich allerdings durch das 43-fache Schussvolumen eine längere Füllzeit ergibt. Die weiteren Rechnungen ergeben, dass weder die Verkürzung der Füllzeit auf das Niveau des Mikroangusses (3) (entspricht einer Einspritzgeschwindigkeit  $v = 86 \text{ mm/s}$ ), noch die Ausnutzung der Möglichkeiten der Spritzgießmaschine mit  $v = 140 \text{ mm/s}$  (4) eine nennenswerte Verbesserung der Formfüllung bewirkt. Wird, wie schon oben, die Schmelze im Spritzzylinder berücksichtigt, ist wieder die Verzögerung des Einspritzvorganges und ein - in diesem Fall sehr deutlicher - Einbruch der Einspritzdynamik zu beobachten. Als Folge dringt die Schmelze praktisch nicht mehr in die Kavität ein.

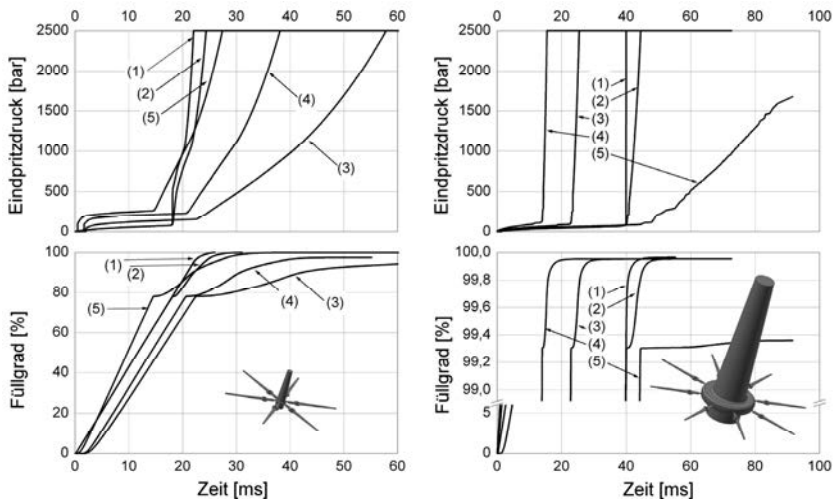


Bild 10: Füllvorgang beim Formteil "Uhrenzeiger" mit "Mikroanguss" (links) und mit "Standardanguss" (rechts) unter verschiedenen Bedingungen.  
(Erläuterungen s. Text)

Insgesamt bildet die Simulation die praktische Beobachtung ab, dass der Mikroanguss mit ausgewogenem Formteil-Anguss-Verhältnis die Füllbarkeit von Mikrokavitäten verbessert.

Wie Anfang dieses Abschnittes angedeutet und im vorigen Beispiel nachgewiesen hat die Schmelzemenge im Schneckenorraum einen Einfluss auf die Füllergebnisse von Mikrostrukturen. In Abb. 11 sind simulierte Füllverläufe zweier Simulationen für die Spritzgießmaschine Arburg ALLROUNDER 170S 180-30 mit dem Formteil „Uhrenzeiger mit Standardanguss“ in Diagrammform und als Füllbilder dargestellt. Diese Rechnungen unterscheiden sich allein durch die gewählten Dosierwege (5 bzw. 40 mm). Dabei wird das Formteil mit dem Dosierweg von 40 mm nicht mehr gefüllt. Der Grund ist die gebremste Einspritzdynamik durch die größere Menge kompressible Schmelze. Bei beiden Einstellungen bricht der Volumenstrom beim Eintritt in den Anguss ein. Bei der Variante mit der größeren Schmelzemenge ist der Einbruch deutlich größer (s.  $t_F = 5$  ms, (1)), die sich langsamer erholt (s.  $t_F = 25$  ms, (2)) und erreicht auch nicht wieder die nominelle Volumenstrom-Vorgabe. Der gesamte Füllvorgang ist im Vergleich zum anderen Variante deutlich verzögert und die dadurch weiter abgekühlte Schmelze kann den Anschnitt kaum passieren (s.  $t_F = 60$  ms, (4)).

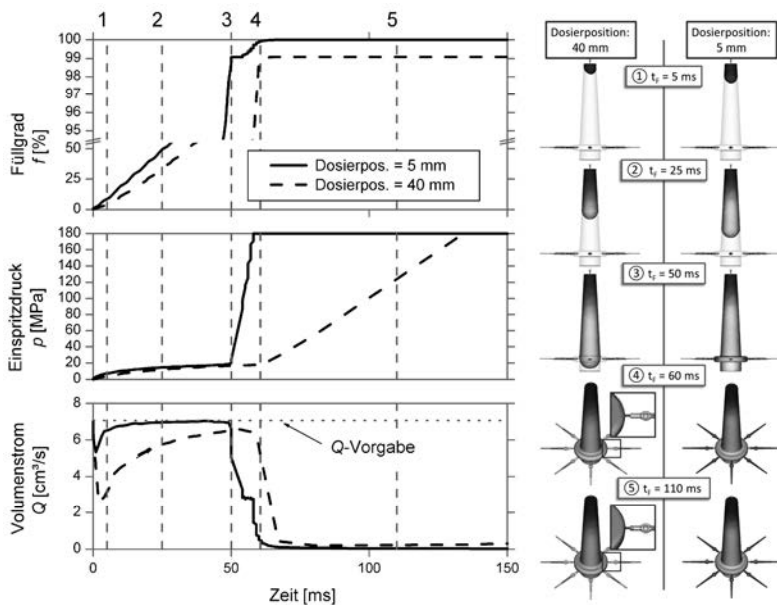


Bild 11: Einfluss der Dosierposition auf das Füllverhalten von Mikroformteilen. Autodesk Moldflow 2015, PMMA IH830C,  $T_{Wz} = 65^{\circ}\text{C}$ ;  $T_M = 220^{\circ}\text{C}$ .

Es zeigt sich also wiederholt, dass die Kompressibilität der Schmelze die Dynamik des Schmelzestromes stark bremst und daher die  $p_vT$ -Daten für die Berechnung der Füllphase und nicht nur, wie oft angenommen, für die Nachdruckphase wesentlich ist. Im Mikrospritzguss sind die Effekte durch das ungünstige Verhältnis zwischen der großen bewegten Schmelzemenge und dem kleinen Formteilvervolumen besonders ausgeprägt. Dass die gezielte Nutzung der Kompressibilität Einspritzdynamik und Füllbarkeit, wie beim Expansionsspritzguss (Engel X-Melt [15]) oder beim Spritzgießen mit Vorkompression [16] erhöhen kann, steht zu den Ergebnissen nicht im Widerspruch.

### 3.5 Fließstab mit Mikrostruktur: Mikrostrukturabbildung

Das Kapitel 3.4 deutet schon die Herausforderung an, die bei der Beurteilung der Füllung von kleinen Formteilen entsteht. Im Folgenden wird eine Arbeit vorgestellt [12], welche die Korrelation zwischen den Ergebnissen der Spritzgießsimulation und der Fertigung bezüglich Abformgenauigkeit von Mikrostrukturen analysiert.

Das für diesen Zweck entwickelte Mikrofließstab-Werkzeug ist auch in diesem Fall für die Mikrospritzgießmaschine (Typ: formicaPlast) ausgelegt. Die Fließweglänge beträgt 46,5 mm und die Formteildicke lässt sich sehr einfach zwischen 0,2 und 1,0 mm ändern. Die Abformgenauigkeit wird mithilfe von auf dem Fließstab angeordneten zylindrischen Mikrostrukturen (Durchmesser: 100 bis 200 µm; Höhe: 150 µm) untersucht. Um die Abformung auf den Fließ- und Erstarrungsvorgang zurückzuführen zu können, sind die Zylinder an dem freien Ende scharfkantig und besitzen dort umlaufend eine Entlüftung. Die drei Mikrostrukturbereiche befinden sich in einem Abstand von 15 mm auf einer Hälfte des Fließstabs und sind dementsprechend angussnah, mittig und angussfern positioniert (Abb. 12).

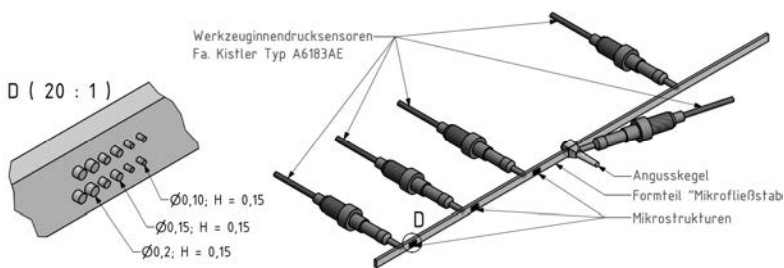


Bild 12: Das Formteil Mikrofließstab mit Mikrostrukturen.

Zur Präzisierung der Randbedingungen werden die Wärmeübergangskoeffizienten mit der in Kap. 3.3 vorgestellten Methode bestimmt. Die gefundenen Werte bestätigen die in [5] gefundenen Zusammenhänge für weitere Formmassen.

Der Einfluss unterschiedlicher Wanddicken bei gleicher Formteilgeometrie auf die Abformung von Mikrostrukturen ist eindeutig. Aufgrund des höheren Werkzeuginnendrucks bei kleineren Wanddicken zeigen sich hier nahezu unabhängig von den Prozesseinstellungen scharfkantige Mikrostrukturen. Mit zunehmender Wanddicke sind eher unvollständig gefüllte Mikrostrukturen zu finden, die Einstellparameter beeinflussen die Abformung immer stärker. Entgegen der Erwartung werden die Mikrostrukturen bei höheren Schmelzetemperaturen nicht besser abgeformt. Im Gegensatz dazu ist der Einfluss der Werkzeugtemperatur unverkennbar: Die Mikrostrukturen sind bei höheren Werkzeugtemperaturen in allen drei Strukturbereichen exakt abgeformt. Generell werden bei den praktischen Versuchen die mittig liegenden Mikrostrukturen am ehesten perfekt abgeformt. Grund dafür könnten die durch die Druckaufnahme detektierte variierende Fließfrontgeschwindigkeiten sein. Die Vorkompression im Anguss



verursacht im angussnahen Bereich eine hohe Geschwindigkeit, die anschließend bis zum Fließwegende abnimmt. So kann die hohe Geschwindigkeit mit unvollständiger Benetzung der Werkzeugoberfläche angussnah und die stark verlangsamte Füllung angussfern die Ursache der unvollständigen Strukturfüllung sein.

Die Simulation zeigt unter ähnlichen Bedingungen wie die Praxis dank optimierter Wärmeübergangskoeffizienten und Berücksichtigung der Komprimierbarkeit teilgefüllte Strukturen. Die Tendenzen, dass höhere Werkzeugtemperaturen, höhere Einspritzgeschwindigkeiten und geringere Wanddicken die Strukturfüllung begünstigen, werden nicht eindeutig wiedergegeben. Die bevorzugte Füllung der mittigen Strukturen ist nicht ersichtlich. Die Änderung der Fließfrontgeschwindigkeit wird von der Simulation abgeschwächt wiedergegeben. Die Simulation der Füllung von Mikrostrukturen ist also darstellbar, aber nicht zuverlässig.

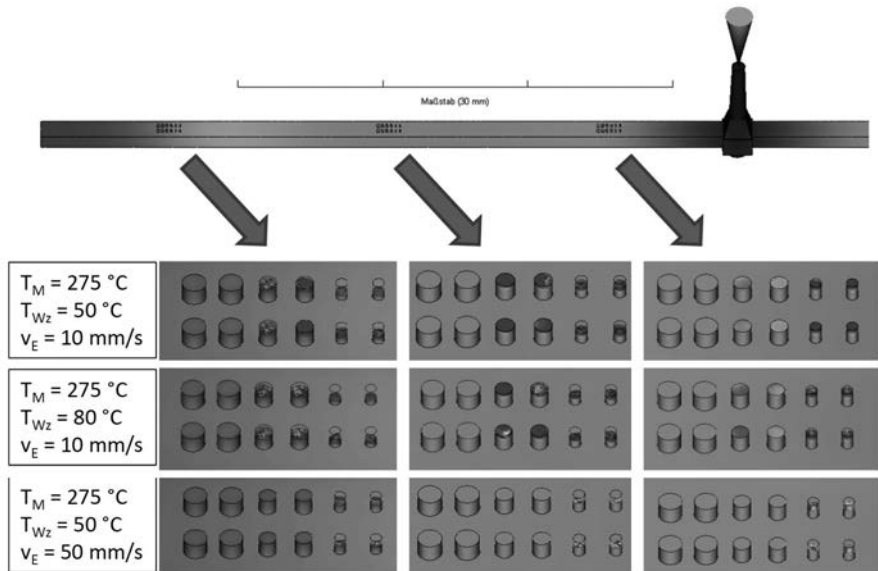


Bild 13: Simulationsergebnis für die Abbildung von Mikrostrukturen an dem Mikroprüfstab.  
Material: PA6 Akulon F223D.

#### 4 Schlussfolgerungen

- Die Simulation funktioniert bei praxisgerechten schnellen Einspritzgeschwindigkeiten zuverlässiger.

- Verwendung von pvT-Daten unerlässlich, weil dadurch die simulierte Einspritzdynamik maßgeblich beeinflusst wird. Die Präzision der Daten ist nicht ausreichend.
- Präzise thermische Daten verbessern das Ergebnis maßgeblich.
- Absolute Aussagen bei der Simulation des Mikrospritzgießens (z. B. gefüllt-nicht gefüllt, Druckbedarf) müssen immer hinterfragt werden. Die Simulation gibt technologische Tendenzen zur Füllung von Mikroformteilen zuverlässig, zur Füllung von Mikroformteilen weniger zuverlässig wieder.

## Literatur

- [1] Jüttner, G.: Plastifiziereinheiten für kleinste Schussgewichte. *Kunststoffe* 94(2004)1, S. 53–55
- [2] Jüttner, G.: Mikrospritzgießmaschinen. In: *VDI Wissensforum Spritzgießen 2006* in Baden-Baden, VDI Kunststofftechnik, 2006, S. 191–202
- [3] Yu, L.; Koh, C.G.; Lee, L.J.; Koelling, K.W.: Experimental investigation and numerical simulation of injection molding with micro-features. *Polymer Engineering and Science*, 42 (2002) 5, pp. 871–887
- [4] Cramer, A.; Michaeli, W.; Friesenbichler, W.; Đuretek, I.: Simulation des Spritzgießprozesses von Mikrobauteilen. *Zeitschrift Kunststofftechnik (WAK)* 3 (2007) 1, S. 1–26
- [5] Nguyen-Chung, T.; Jüttner, G.; Pham, T.; Mennig, G.; Gehde, M.: Die Bedeutung präziser Randbedingungen für die Simulation des Mikrospritzgießens. *Zeitschrift Kunststofftechnik (WAK)* 4 (2008) 6, S. 1–25
- [6] Nguyen-Chung, T.; Jüttner, G.; Löser, C.; Pham, T.; Gehde, M.: Determination of the heat transfer coefficient from short-shots studies and precise simulation of micro-injection molding. *Polymer Engineering and Science* 50 (2010) 1, pp. 165–173
- [7] Yao, D.; Kim, B.: Simulation of the filling process in micro channels for polymeric materials. *J. Micromech. Microeng.* 12 (2002), S. 604–610
- [8] Gao, P.; Person, S.L.; Favre-Marinet, M.: Scale effects on hydrodynamics and heat transfer in two-dimensional mini and microchannels. *Inter. J. Thermal Science* 41 (2002), S. 1017–1027
- [9] Michaeli, W.; Hoffmann, S.; Kratz, M.; Starke, C.: Spritzgießsimulation - Wege zur Verbesserung der Vorhersagequalität (Verbesserung der Simulation von Schwindung und Verzug durch neue Methoden der Materialcharakterisierung). 21. Internationales Kunststofftechnisches Kolloquium (2002), Block 3
- [10] Michaeli, W.; Lingk, O.; Baranowski, T.; Brinkmann, M.: Spritzgießen - Simulation (Ermittlung von prozessnahen pvT-Daten als Beitrag zur Verbesserung der Spritzgießsimulation). 24. Internationales Kunststofftechnisches Kolloquium (2008)
- [11] Takahashi, H.; Matsuoka, T.; Kurauchi, T.: Rheology of Polymer Melts in High Shear Rate. *Journal of Applied Polymer Science* 30(1985) 12, S. 4669–4684
- [12] Löser, C.; Jüttner, G.; Bloß, P.: Hier gelten andere Regeln – Simulation versus Praxis beim Mikrospritzgießen – eine besondere Herausforderung. *Kunststoffe* 105 (2015)5, S. 42–45

- [13] Schmidt, R.; Jüttner, G.; Krause, S.; Röhrich, T.; Röllig, M. ; Schneider, W.: Polymer-basierte Bumparrays zur Stressreduzierung großflächiger Area-Array-Komponenten auf Leiterplatten. In: Tagungsband zu EBL 2008 4. DVS/GMM-Tagung, 2008
- [14] Jüttner, G.; Eberhardt, W.; Buckmüller, P. ; Löser, C.: Wirtschaftliche Her- stellung von miniaturisierten Moulded Interconnect Devices (MID) mit Zweikomponenten- Mik-rospritzguss. In: Tagungsband zu Technomer '11 in Chemnitz, 2011, S. V 1.4, 1–12
- [15] Steinbichler, G; Lampl, A.; Pöttler, A: Rekordverdächtig dünn – Expansionsspritzgie-ßen. Kunststoffe 94(2004) 12, S. 126-134
- [16] Pötsch, G.; Aebi, G.: Spritzgießen mit Vorkompression. Kunststoffe 93(2003) 9, S. 70–75

## Laser Direct Structuring

### 3D Schaltungsträger für Elektromechanische Anwendungen

**“A simple and precise technology for producing 3D molded interconnect devices”**

Ing. **F. van Vehmendahl**, **B. Schrauwen**, R&T MEP Europe,  
Mitsubishi Engineering-Plastics, Geleen, Niederlande



Company Profile MEP

## Company Profile

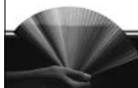


Mitsubishi Engineering-Plastics Corporation

- A Joint Venture of Mitsubishi Gas Chemical Company, Inc. and Mitsubishi Chemical Corporation
- A leading supplier of engineering plastics, focusing on developing innovative solutions for several end markets
- Leading position in polycarbonate resins (#1 Asia-Pacific, and Global Top 3) serving all regions and markets
- Mitsubishi Engineering-Plastics Corporation is part of the Mitsubishi Group Companies

### Key Facts & Figures (April 2011 – March 2012)

Establishment	March 1994
Capital	36.5 billion US\$
Net Sales	105.4 billion US\$
Consolidated net sales	179.2 billion US\$ (approx. 1.6 billion Euro)
Employees	Approx. 1,000



## Mitsubishi Chemical Holdings Group

Mitsubishi Chemical Holdings Corporation

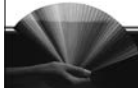
The Mitsubishi Chemical Holdings Group is made up of 4 core companies and in total around 420 group companies, subsidiaries and affiliates



### Key Facts & Figures

Established:	October 3, 2005
President:	Yoshimitsu Kobayashi
Paid-in capital:	¥50.0 billion
Listings:	Tokyo Stock Exchange, Osaka Securities Exchange
Business domains:	Performance Products, Health Care & Industrial Materials
Consolidated net sales	¥3,498.8 billion (FY2013)   26 billion Euro
Consolidated operating income	¥110.5 billion (2013)
Group employees:	6,031

**Good Chemistry for Tomorrow**  
Creating better relationships among people, society, and our planet.



# Mitsubishi Chemical Holdings Group



Mitsubishi Tanabe Pharma

MITSUBISHI PLASTICS

MITSUBISHI RAYON CO., LTD.



Life Science Institute



Rank 2014	Company	\$m 2014
1	BASF *	90,013
2	Sinopec *	68,872
3	Dow Chemical	58,167
4	ExxonMobil <sup>1/2</sup>	56,395
5	SABIC	50,122
6	LyondellBasell Industries	45,606
7	DuPont	34,725
8	Mitsubishi Chemical *	30,476
9	INEOS *	27,005
10	Bayer †	26,965
11	Shell <sup>1/2</sup>	24,607
12	Total <sup>1/2</sup>	24,600
13	LG Chem	20,672
14	Linde Group	20,644
15	Sumitomo Chemical *	19,812
16	Air Liquide	18,595
17	PTT Global Chemical *	17,445
18	Braskem	17,320
19	AkzoNobel	17,315
20	Toray *	16,769

## Mitsubishi Gas Chemical Company, Inc

### Key Facts & Figures

Establishment: 1951

Net Sales (2013): **534.6 Billion JPY (~4 Billion Euro)**

Operating income (2013): 11.4 Billion JPY

Employee: 5,445

Main Products:

Chemicals:

Methanol, Ammonia, Polyols, Amines, MMA, Xylene Derivatives,

Hydrogen Peroxide, Specialty Intermediates

Polymers:

Polycarbonates, Polyacetal, PPE, MX-Nylon

Ranking 2014 ICIS:

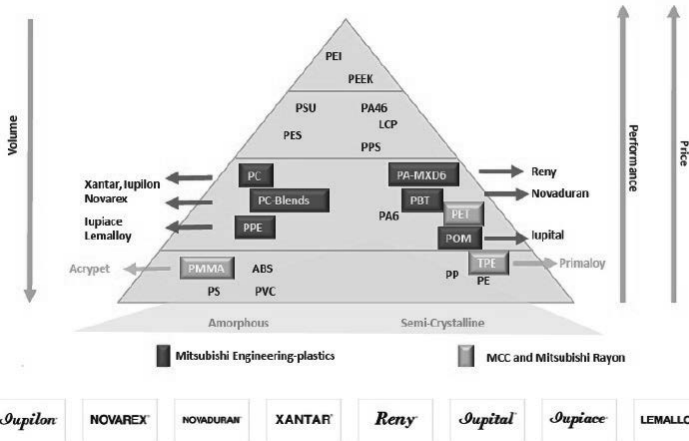
81

**MGC**



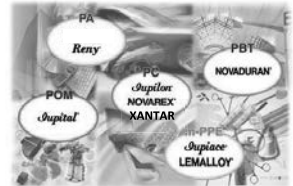
**MGC** MITSUBISHI GAS CHEMICAL COMPANY, INC.

## MEP product portfolio



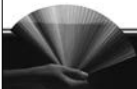
## MEP Product Portfolio

<b><i>Iupilon</i></b>	Polycarbonate Resin (PC)
<b>NOVAREX<sup>®</sup></b>	Polycarbonate Resin (PC)
<b>XANTAR<sup>®</sup></b>	Polycarbonate Resin (PC)
<b>NOVADURAN<sup>®</sup></b>	Polybutylene Terephthalate Resin (PBT)
<b><i>Reny</i></b>	Polyamide MXD6 Resin (PA-MXD6)
<b><i>Iupital</i></b>	Polycetal Resin (POM)
<b><i>Iupiac</i></b>	Modified PPE Resin (m-PPE)
<b>LEMALLOY<sup>®</sup></b>	Modified PPE Resin (m-PPE)





## What is a 3D Molded Interconnect Device



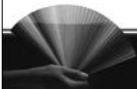
### *Real 3D Molded Interconnect Device*

Creative 3D MID solution



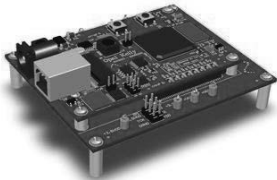
Source: [www.opalkelly.com](http://www.opalkelly.com)

Source: [www.instructables.com](http://www.instructables.com)

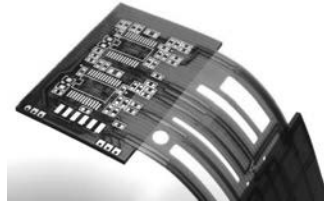


## Real 3D Molded Interconnect Device

Close, but still not real 3D



Source: [www.opakelly.com](http://www.opakelly.com)



Source: [dir.indiamart.com](http://dir.indiamart.com)



## Real 3D Molded Interconnect Device

Real 3D MID solution using LDS Technology



Source: [www.opakelly.com](http://www.opakelly.com)



Source: Kromberg & Schubert GmbH & Co. KG



Realization of 3D electrical circuitry on a plastic part using following steps:



1: Injection molding of special LDS material



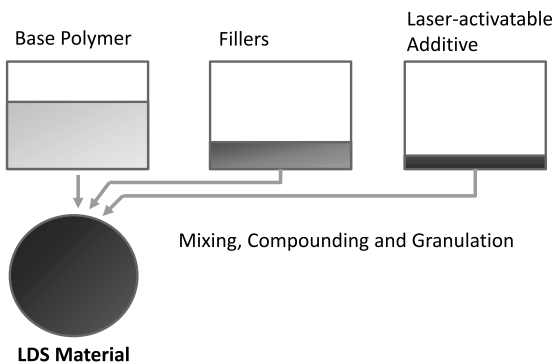
2: Laser activation of surface structure



3: Metallization using electroless copper baths

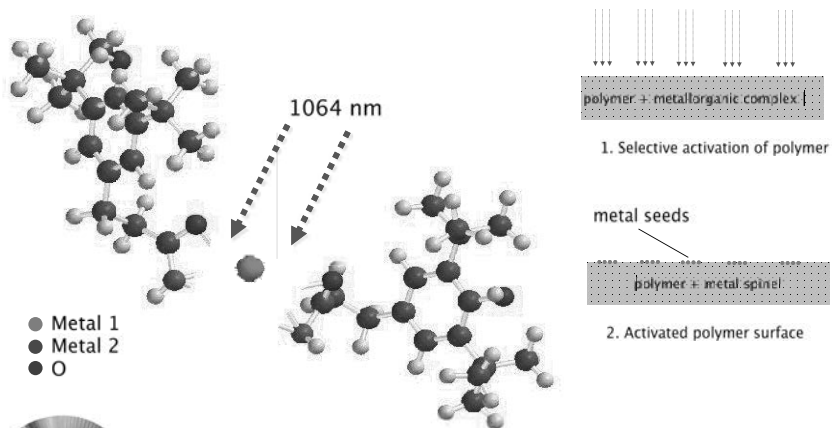
## MEP's core know how

### Material Modification: Doping with a Laser-activatable Additive



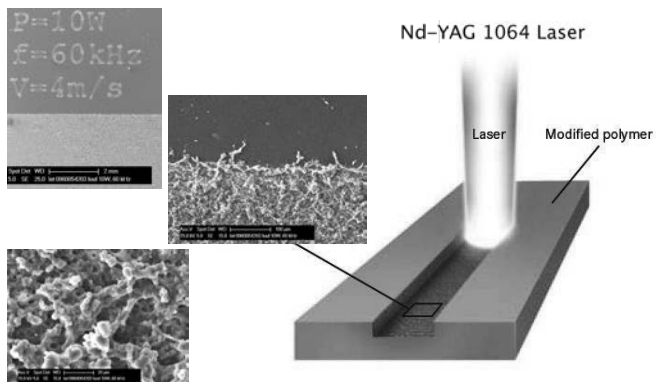
## Laser Processing

### Laser Structuring - activation of the LDS additive



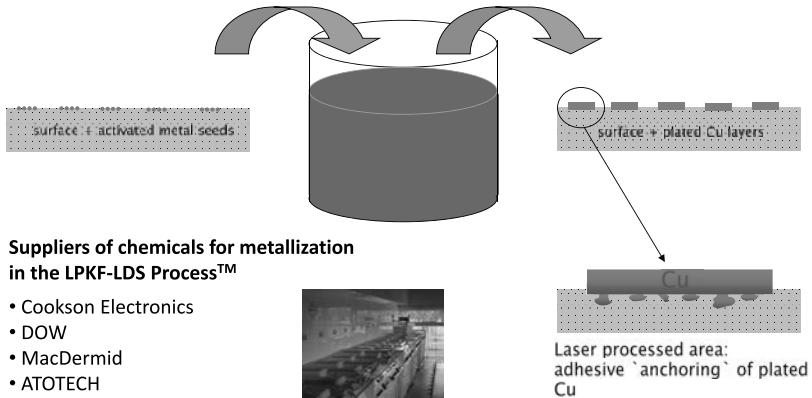
## Laser Processing

### Laser Structuring – ablation of polymer surface



## Metallization

Start with building Copper layer in Electro-less (chemical) plating bath



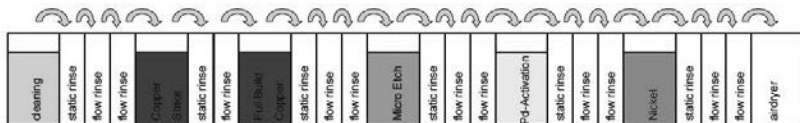
Suppliers of chemicals for metallization  
in the LPKF-LDS Process™

- Cookson Electronics
- DOW
- MacDermid
- ATOTECH
- Albert Industries



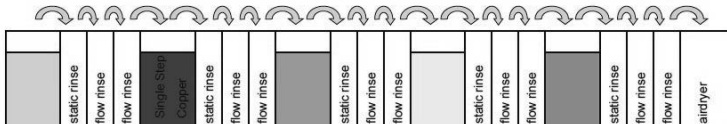
## Metallization

2-step Copper Plating Line Design is crucial for PC and PC-ABS



- Cu-strike: e.g. M-Copper 85 (Mc Dermid) for 1-2  $\mu\text{m}$  'starting' layer
- Cu-build: e.g. Circuposit 4500 (Dow / Rohm & Haas) for 4-8  $\mu\text{m}$  full Cu layer  
(No Cu deposit if 4500 is used without Cu-strike)

1-step Copper Plating Process (for non PC based materials)



- Reduction of bath chemistry costs & increase production capacity

## Mass production in Asia

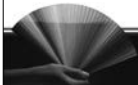


### *Market for LDS technology*

Installation of LDS Equipment for LPKF-LDS®



Source: LPKF Laser & Electronics AG

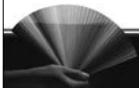


## Communication Examples: Antenna Systems

### Antenna in Consumer Electronics

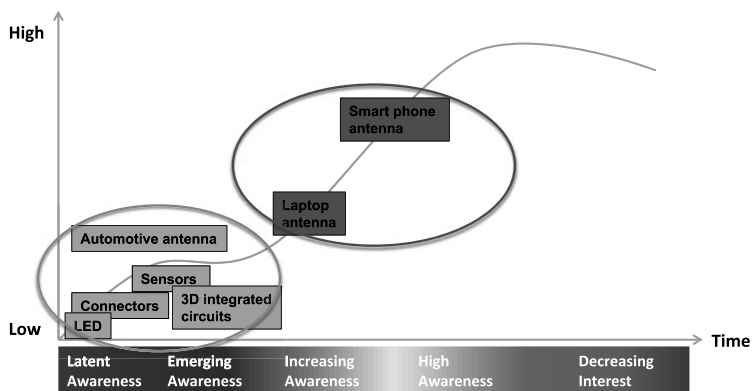


Now it's time for mass production in Europe



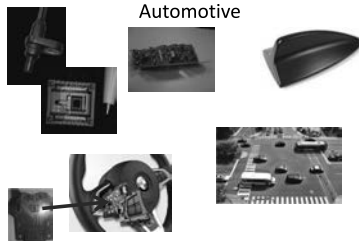
## Lifecycle LDS applications

LDS antenna in Consumer Electronics has reached high awareness level



## Segments and applications

Wireless communication in Consumer goods



Wiring Devices



Medical



LED Lighting systems





## Examples LDS applications in Europe

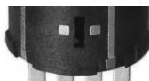
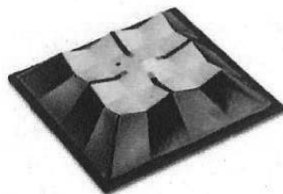
3D MID Conference Fürth: BMW

PCB antennas

Conformal  
3D

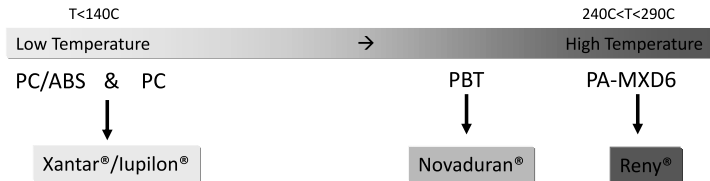
New antenna designs needed to cope with future high density information exchange in automotive: Leibniz University Hannover

R&D



MEP's LDS product portfolio

## MEP LDS Product Portfolio

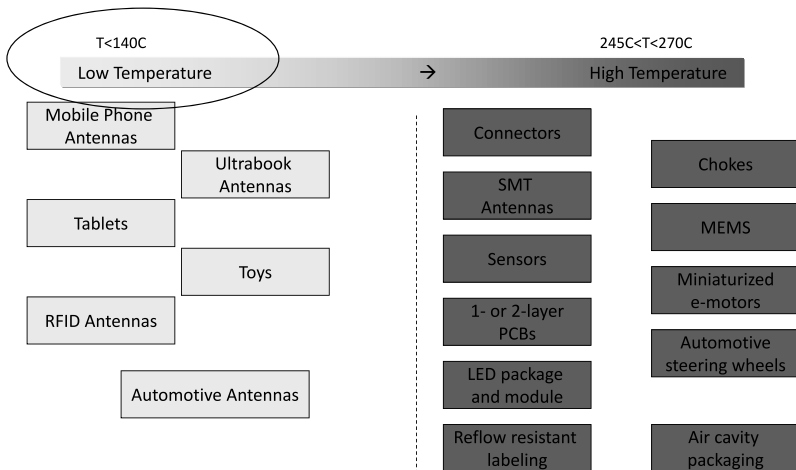


• MEP has the broadest portfolio of materials suitable for Laser Direct Structuring and covers the entire temperature range including the demanding reflow soldering at  $260^{\circ}\text{C}$

• Available grades:

- For Low Temperature applications (No or Special Soldering): Xantar, Iupilon, Novaduran
- For High Temperature applications (Reflow Soldering): Reny

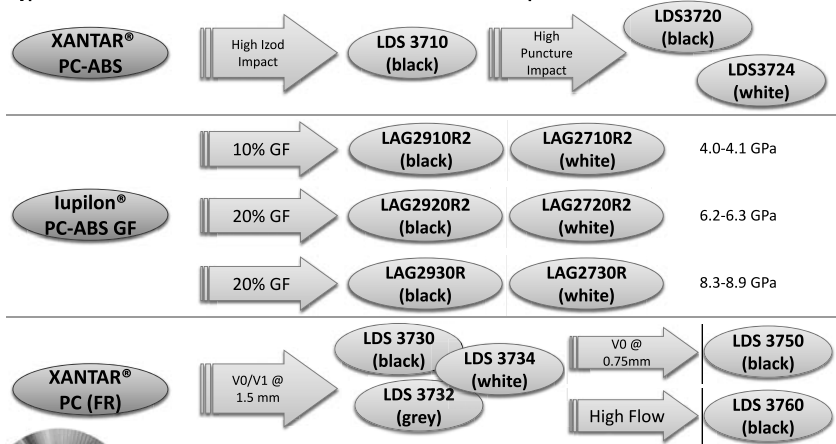
## Segmentation of LDS applications



## MEP XANTAR® & Iupilon® LDS Portfolio

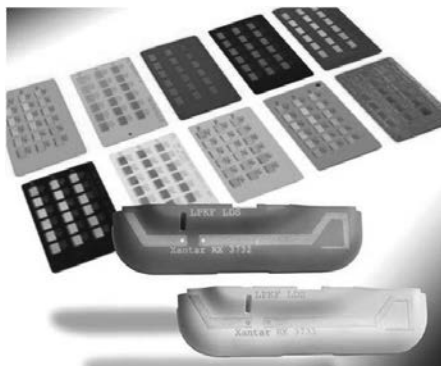
### Types of base resin

### Commercial & Development Grades

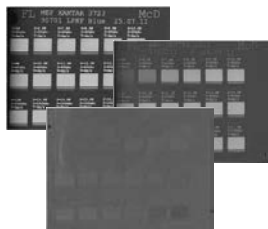


## Introduction of customer specific colours

White colour materials LDS 3724/3734 can be color matched at customer request

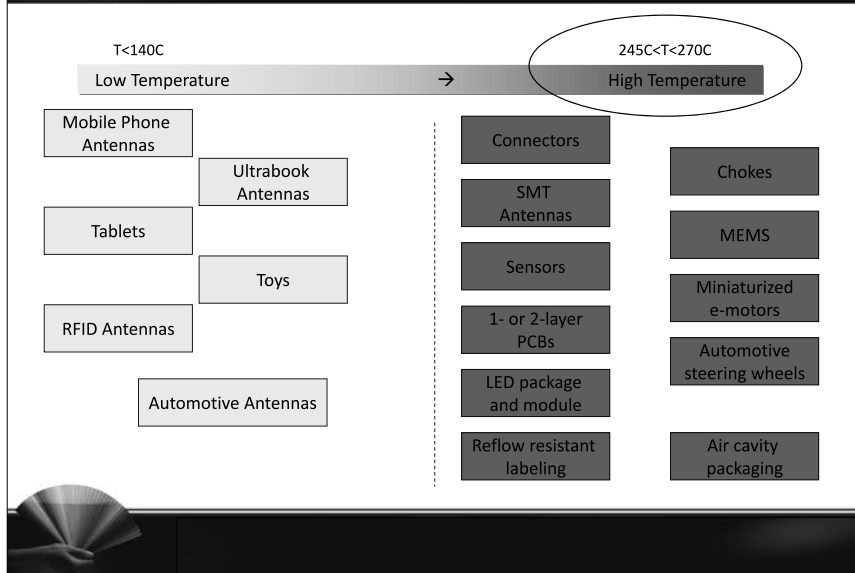


Interactions between colour pigments and LDS additive should be taken into account:



Each new colour match should be checked on LDS plating performance

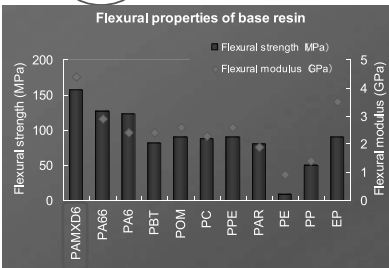
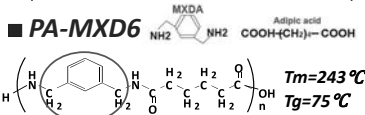
## Segmentation of LDS applications



Introducing Reny LDS material

## What is Reny

- Reny is based on high stiffness crystalline polyamide resin "PA-MXD6".
- We have launched since 1984. and the current capacity of PA-MXD6 is 25,000t/Y.
- Special aromatic structure lead to unique properties (Polyarylamide).

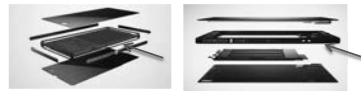


- PA-MXD6 can add much GF or filler without losing good surface appearance.
- Reny has excellent strength and modulus.
- Lower water absorption than PA66 or PA6.

Suitable for replacement metal!

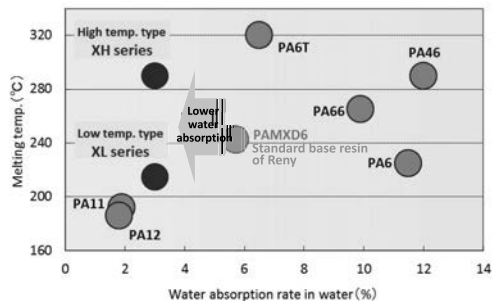
- E&E, Automotive, Construction, etc...

e.g. waterproof phone/tablet



## New Reny base resin

Introducing 2 new plant based Reny materials: XH and XL series



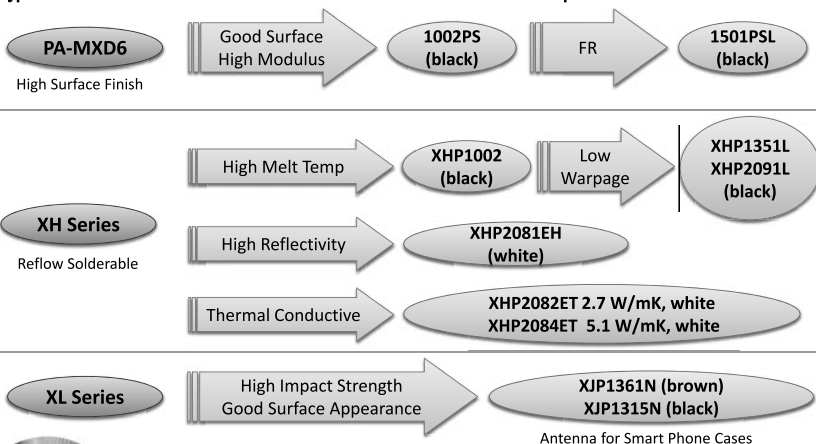
New Plant based PA resin exhibits low moisture uptake:

- High mechanical properties
- Good dimension stability
- Stable RF behavior

## Reny® LDS Portfolio

### Types of base resin

### Commercial & Development Grades



## Introduction of 1<sup>st</sup> Solderable White LDS Material

Properties	XHP2081EH
GF+filler [%]	Totally 40
Density	1.64
Tensile strength [MPa]	94
Tensile modulus [MPa]	7,100
Flexural strength [MPa]	142
Flexural modulus [MPa]	6,600
Charpy unnotched [kJ/m <sup>2</sup> ]	23
Charpy notched [kJ/m <sup>2</sup> ]	2.0
Remarks	Reflectivity @460nm >80%

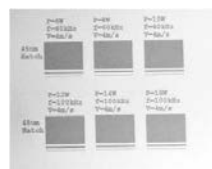


Table. Color information

	XHP2081EH
L	86.32
a	-1.38
b	-0.44
YI	-1.84

Combination of MEP's innovative white LDS technology and Reny®'s high melt temperature XHP series opens new doors for using LDS (e.g. LED)

## Introducing Reny TC - LDS

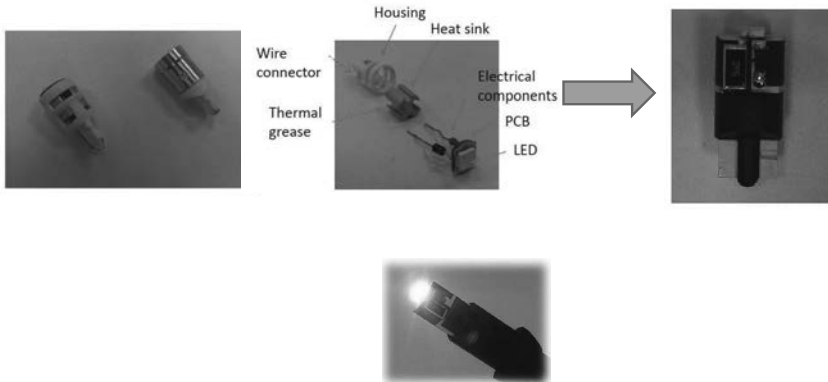
### Thermal Conductive Reny LDS

- XHP2082ET (TC in plane 2.7 W/mK, through plane 1.0 W/mK)
- XHP2084ET (TC in plane 5.1 W/mK, through plane 1.0 W/mK, restricted)

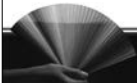


## Case Study Philips Lighting

### MID Concept for T10 automotive interior light

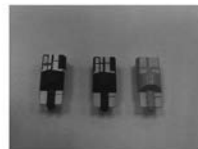


Source: Philips Lighting

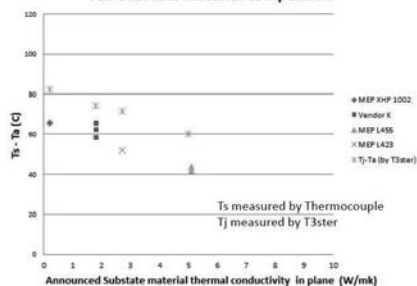


## Introducing Reny TC - LDS

Material	In plane K (W/mk)	Tj (C)
MEP XHP1002	0.2	107.42
KingFa 6942	1.8	99.01
MEP Reny T423	2.7	96.54
MEP Reny T455	5	85.11



T10 substate material comparison



- Ts and Tj showed the same trend of material thermal conductivity vs. system thermal capability
- MEP Reny T423 and T455 meet the thermal requirement

Source: Philips Lighting

## Summary



## *Summary LDS technology*

- Making of Real 3D molded interconnect device
- Already mass production of antenna systems in Asia
- Extremely flexible
- Only three process steps (1K shot moulding, laser processing, metallization)
- One process serves prototyping and high volume production
- Fine-line processing down to 150 micron pitch
- Through holes down to 50 micron diameter





# Trends in Displaytechnik und Optoelektronik

Dr.-Ing. J. Ackermann,  
Evonik Performance Materials GmbH, Darmstadt

## Kurzfassung

Die Displayfertigung befindet sich einschließlich der Komponentenfertigung im Bereich der Consumer Electronic (TV- & PC-Monitore, Tablet PC, Smartphones) fest in der Hand asiatischer Zulieferer. Chancen ergeben sich dabei für europäische Firmen nur noch den Materialherstellern, indem sie die benötigten Polymere, wie z.B. PMMA, in optischer Qualität vor Ort in Asien herstellen. Für europäische Kunststoffverarbeiter eröffnen sich durch die Weiterentwicklung der optoelektronischen Technologien und deren Diffusion in neue Felder wie Automotive, den Hausgerätesektor oder Wearables viele neue Chancen. Touchanwendungen im Zusammenspiel mit HMI-Bedienkonzepten (Human Machine Interface) liegen im Trend und bringen die mittlerweile intuitive Bedienung von Smartphones über Gestensteuerung in diese Anwendungen, wobei 2D- & 3D-Freiformflächen aus Designgründen an Wichtigkeit gewinnen. Mittels der von Evonik und KraussMaffei gemeinschaftlich entwickelten CoverForm<sup>®</sup>-Prozesstechnologie können kratzfest ausgestattete PMMA-Bauteile, die die Anforderungen an Design, Optik und Medienbeständigkeit erfüllen, in einem Prozessschritt kostengünstig hergestellt werden. Zusätzlich können kratzfeste Mikrostrukturen – auch in unmittelbarer Nachbarschaft zu Hochglanzbereichen – erzeugt werden.

## 1. Einleitung

Basierend auf den großen technischen Fortschritten in Bezug auf opto- und mikroelektronische Komponenten sowie der Halbleitertechnik Ende des 20. Jahrhundert hat sich eine rasante Entwicklung bei den darauf basierenden optoelektronischen Geräten zur Bild Darstellung ergeben. Displays, Flachbildschirme und -fernsehapparate, Smartphones und Tablets sowie immer mehr integrierte Touch-Funktionen sind nicht mehr aus unserem täglichen Leben wegzudenken. Die Innovationszyklen werden immer schneller, die Lebenszyklen der Geräte im Markt immer kürzer. Asiatische und US-amerikanische OEM (Original Equipment Manufacturer) prägen den Markt im Consumer Electronics Bereich, die Supply Chain für die Fertigung der Endgeräte wird hauptsächlich von asiatischen ODM (Original Design Manufacturer) und Auftragsfertigern abgebildet. Welche Chancen bieten sich nun europäischen Kunststoffherstellern und Kunststoffverarbeitern an dieser schnelllebigen Industrie und den zugehörigen Anwendungen und Technologien zu partizipieren?

## 2. Technologie- und Marktübersicht / Trends

Technologisch hat sich in den letzten Jahren klar die TFT LCD Technologie gegenüber der traditionellen Kathodenstrahlröhrentechnologie durchgesetzt. Letztere ist heute kaum noch relevant. Während die Plasmatechnologie aktuell ebenfalls vom Markt verschwindet, tritt mit der OLED Technologie eine neue vielversprechende Technologie in den Markt ein. Weil Flüssigkristallanzeigen (LCD) nur das Licht modulieren und selbst kein Licht abgeben, wird für Bildschirmenwendungen eine flächige Beleuchtung (die sogenannte Back Light Unit = BLU) hinter der Flüssigkristallanzeige angebracht, um die Bildinformation im Durchlicht (Transmission) darzustellen. Als Lichtquelle werden dabei heute nahezu ausschließlich LED in Kanten- oder Hinterleuchtung eingesetzt. Hierdurch ergibt sich durch reduzierten Stromverbrauch ein umweltfreundliches Produkt, das durch verschiedene Technologien hohe Auflösung (HD – 720p, FHD – 1080p, UHD – 2k/4k) und damit hervorragende Bildqualität verspricht und auch in den Designmöglichkeiten unheimlich gewonnen hat (ultra-dünn, geringes Gewicht, nahezu rahmenlos, leicht gekrümmt). Wie Bild 1 zeigt, wird demgegenüber bei einem OLED Display durch die verwendeten selbst emittierenden organischen Halbleiter (kleine organische Moleküle oder Polymere) das Licht erzeugt, wodurch keine BLU benötigt wird. Hierdurch können durch den Wegfall einer ganzen Baugruppe nicht nur die Kosten reduziert, sondern durch die reduzierte Displaydicke völlig neue Designs ermöglicht werden – insbesondere wenn in Zukunft statt Glassubstraten polymere Trägerfolien in Rolle-zu-Rolle (R2R) Verfahren zum Einsatz kommen können: gekrümmte Designs, biegbare, teil-transparente Displays oder gar rollbare Displays könnten hierdurch nicht länger nur eine Vision bleiben. Speziell bei großformatigen Bildschirmenwendungen, also im TV- und PC/Notebook-Monitor Segment, hat sich bisher die Skalierbarkeit in die Massenproduktion und die Haltbarkeit der OLED-Displays als problematisch erwiesen. Während bei einem 5“ Smartphone Display

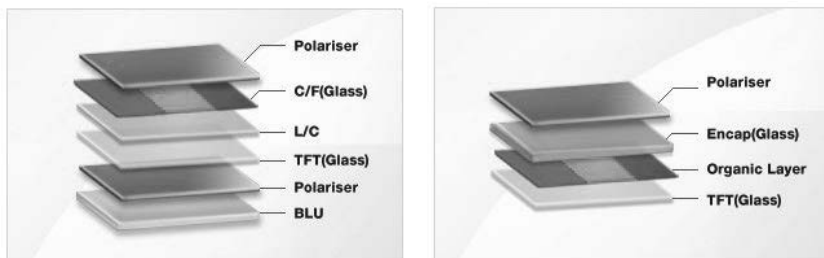


Bild 1: Schema der LED TFT Display Technologie (links) und der OLED TFT Display Technologie (rechts)

aktuell das OLED-Display bei den Kosten nur noch lediglich um den Faktor 1,3 über dem LCD liegt (21 \$ OLED versus 16 \$ LCD), beträgt der Unterschied beim 55“ TV Display noch mindestens den Faktor 4 (1.400 \$ OLED versus 350 \$ LCD). Da kleine OLED-Displays zusätzlich eine bessere Performance hinsichtlich Kontrastverhältnis und Farbdarstellung bieten und die zuvor beschriebenen Designoptionen ermöglichen (z.B. Samsung Galaxy Edge), nimmt der Anteil an AMOLED Displays (Active Matrix OLED) bei Smartphones hingegen kontinuierlich zu (siehe Bild 2). Während im Segment der großflächigen Displays (dazu zählen alle Displays mit > 9“ Bildschirmdiagonale: LCD TV, PC Monitor, Notebook PC, Tablet PC) die Stückzahlen eher stagnieren [1], wächst das Segment der kleinen und mittelgroßen Displays weiter signifikant an (siehe Bild 3). Das Gesamtwachstum wird dabei durch ein stetiges weiteres Wachstum im Bereich Smartphones und durch neue Anwendungen getrieben. Der Lebenszyklus der Produkte der Displaytechnik (Bild 4) zeigt, dass sich neue Chancen auf Wachstum insbesondere im Bereich der Wearables (z.B. Smart Watch), Automotive Displays und Hausgerätedisplays (Home Appliance) ergeben.

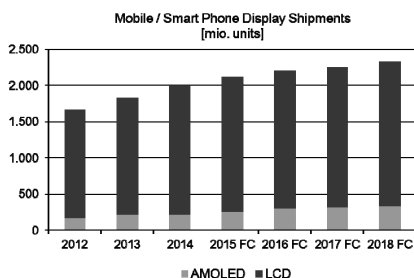


Bild 2: Entwicklung des Smartphone Segments nach Stückzahlen und Penetrationsrate für die AMOLED-Technologie [2]

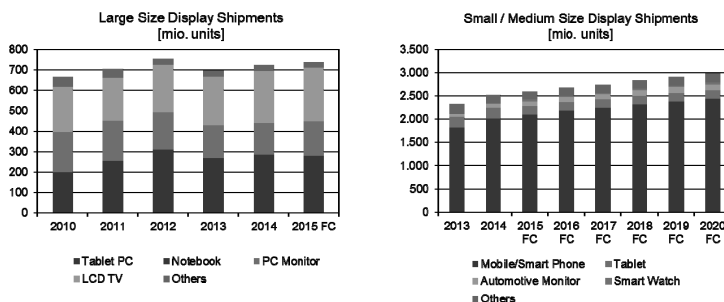


Bild 3: Entwicklung des Großformat-Segments (> 9“) und Klein-/Mittelformat-Segments (< 9“) nach Stückzahlen [2]

Die Displayindustrie wird durch asiatische und US-amerikanische OEM im Consumer Electronics Bereich geprägt, es gibt quasi keinen ernst zu nehmenden europäischen Player mehr in diesem Industriesegment. Die Supply Chain für die Fertigung der Endgeräte wird hauptsächlich von asiatischen ODM und Auftragsfertigern abgebildet. Die Fertigung hat sich dabei über die letzten zwei Jahrzehnte von Japan über Korea nach Taiwan verlagert. China versucht nun in diesem Umfeld basierend auf seiner Industriepolitik einen signifikanten Anteil zu erlangen. Für die Fertigungsfirmen und deren Zulieferer werden die Margen aufgrund des hohen Wettbewerbsdruck immer kleiner. Auch für die Materialhersteller wird es aufgrund der Commoditisierung der einst als Spezialitäten entwickelten Materialien immer schwieriger die Zielmargen zu erwirtschaften. Eine regionale Produktion vor Ort ist dabei mittlerweile nahezu unumgänglich.

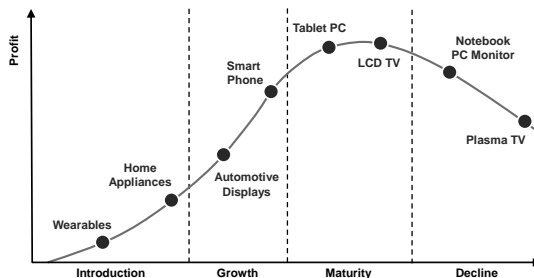


Bild 4: Lebenszykluskurve der Produkte im Bereich Displaytechnik

### 3. Polymere für optoelektronische Anwendungen

Die Anforderungen an Kunststoffe für optoelektronische Anwendungen sind recht klar umrissen: aufgrund der benötigten optischen Eigenschaften wie Lichtleitung, Lichtbrechung, und Lichtstreuung spielen zunächst Kenngrößen wie die Transmission, Gelbwert und Haze, der Brechungsindex, die Abbe-Zahl, Doppelbrechungseigenschaften, die Optische Dämpfung, der Grenzwinkel der Totalreflexion, etc. eine wichtige Rolle. Zusätzlich sind bestimmte thermo-mechanische Eigenschaftsanforderungen zu erfüllen. Diese werden durch notwendige Prozessierungsschritte bei der Bauteilfertigung oder die spätere Anwendung des Endgerätes vorgegeben. Kommen in den Anwendungen mechanische Belastungen durch z.B. regelmäßige Berührung dazu, dann sind noch Eigenschaften wie Kratz- und Abrasionsbeständigkeit sowie Chemikalienbeständigkeit von großer Bedeutung. Aufgrund der Reinraumproduktion der optoelektronischen Komponenten sind die Sauberkeits- und Qualitätsanforderungen als hoch einzustufen. Die Liste der in Frage kommenden polymeren Werkstoffe umfasst u.a.:

- Polymethylmethacrylat (PMMA)
- Polymethylmethacrylimid (PMMI)
- Styrol-Methylmethacrylat-Copolymere (SMMA oder MS)
- Polycarbonat (PC)
- Cycloolefinische Copolymere (COC / COP)

Hinzu kommen noch Spezialgläser, wie beispielsweise dünnes, chemisch vorgespanntes Alumosilikatglas (Corning Gorilla® Glass oder Schott Xensation® Cover), das hauptsächlich als Abdeckglas für Displays von Geräten mit Touchscreens eingesetzt wird.

Ein das Anforderungsprofil meist sehr gut abdeckender Werkstoff ist das PMMA (siehe Tabelle 1). Aus diesem Grund hat die Evonik Performance Materials GmbH, Darmstadt als weltweit führender Hersteller von PMMA-Formmassen spezielle optisch hochreine Formmasstypen für optoelektronische Anwendungen entwickelt, die sie unter dem Namen PLEXIGLAS® Optical POQ (Pure Optical Quality) vertreibt: PLEXIGLAS® Optical POQ 62 & POQ 64 für die Verarbeitung im Spritzguss und Spritzprägen, PLEXIGLAS® Optical POQ 66 für die Verarbeitung in Extrusionsprozessen. PMMI-Typen (PLEXIMID®) bieten zusätzlich eine höhere Wärmeformbeständigkeit bei gleichzeitig sehr hoher Chemikalien- und Spannungsrissebeständigkeit. Seit neuestem bietet Evonik auch spezielle PMMA-basierte Folien (z.B. PLEXIGLAS® Film 0F058) zur Verwendung als ultradünne Lichtleiter an, die aufgrund hoher optischer Reinheit und Transparenz einen hocheffizienten Einsatz bei LED-Anwendungen erlauben.

Aufgrund des ausgewogenen Eigenschaftsprofils hat sich PMMA als besonders geeignet zur Herstellung von Lichtleitern für Back Light Units und Front Light Units erwiesen. Daneben findet es zunehmend Verwendung als Glasersatz in Touchanwendungen (Cover Lens). Weitere Einsatzfelder sind Gehäuse / Gehäuseteile und Displayabdeckungen.

#### **4. Lichtleiter für Flachbildschirmanwendungen**

Wie zuvor beschrieben bedarf es bei Flüssigkristalldisplays einer zusätzlichen Beleuchtungseinheit zur Bilddarstellung in Durchleuchtung. Diese sog. Back Light Unit besteht aus mehreren übereinander gestapelten optischen Folien und Platten, die dazu dienen die Flüssigkristallanzeige (LCD Panel) von hinten möglichst gleichmäßig und effizient zu beleuchten (siehe Bild 5). Gemäß dem in Bild 6 dargestellten Wirkprinzip einer Back Light Unit übernimmt dabei die Lichtleitplatte (Light Guide Plate) im Zusammenspiel mit der Streuscheibe bzw. -folie (Diffuser, Diffusion Sheet) die homogene Verteilung des punktförmig über Kanten (edge-lit Modus) eingekoppelten LED-Lichts und die gleichmäßige Emission des Lichtstroms über eine große Fläche – also die Umwandlung von vielen Punkt leuchten mit sehr hohen

Tabelle 1: Eigenschaftsprofil polymerer Werkstoffe für die Optoelektronik

	PMMA	PMMI	COC	COP	SMMA	PC
Optical Properties						
Transmission @ 3 mm [%]	92	91	91	92	92	89
Refractive Index [-]	1,49	1,53	1,53	1,53	1,57	1,59
Abbe Number [-]	59	53	56	57	34	30
Total Internal Reflection [°]	42,2	40,8	40,8	40,8	40,2	39,0
Birefringence [nm]	< 20		< 20			< 65
Mechanical Properties						
Flexural Modulus [MPa]	3300	4000	3200	2100	3400	2350
Pencil Hardness [-]	3H	4H	H	F		6B
Vicat Softening Temp. (VST) B50 [°C]	97-108	150-170	134	138	100	145
Heat Deflection Temp. (HDT) 0,45 MPa [°C]	100-103	140-158	127			138
Heat Deflection Temp. (HDT) 1,8 MPa [°C]	97-104	133-149		123	79	124
Other Properties						
Density [g/cm³]	1,19	1,21	1,02	1,01	1,11	1,19
Moisture Uptake [%]	0,3	0,6	< 0,01	< 0,01	0,1	0,1

punktförmig abgestrahlten Leuchtdichten in eine homogene Flächenleuchte [3-7]. Die alternativ eingesetzte Hinterleuchtung des LCD Panel (back-lit Modus) ist zwar einfach im Aufbau, die LEDs müssen aber einen Abstand von mehreren Zentimetern zur Streuscheibe aufweisen, um eine homogene Verteilung der Leuchtdichte über die Streuscheibe zu gewährleisten. Dadurch ergibt sich eine deutlich größere Bauteiltiefe im Vergleich zu den kantenbeleuchteten Flächenleuchten. Solche hinterleuchteten Displays finden somit nur bei Fernsehgeräten im Niedrigpreissegment Verwendung.

Die verwendeten Lichtleiter bestehen beim edge-lit Modus aus hochtransparenten Materialien, welche die Totalreflexionseigenschaften nutzen, um Licht im optisch dichteren Material



zu leiten. Damit das über eine oder mehrere Kanten eingekoppelte Licht nicht bis zur gegenüberliegenden Kante des Lichtleiters transportiert, sondern vorher aus der Platte extrahiert wird, müssen Störstellen in die Oberfläche der Lichtleitplatte eingebracht werden. Diese sollen das Licht so streuen, dass es teilweise aus dem Lichtleiter ausgekoppelt wird und möglichst die Lichtverteilung eines Lambert-Strahlers (vollkommen diffuser Strahler) aufweist. Solche Lichtauskopplungsstrukturen können durch eine der folgenden Technologien erzeugt werden [5-7]:

- Aufgedruckte Punktmuster: Siebdruck oder Inkjetdruck (off-line)
- Mikrostrukturen: Heißprägen (in-line) oder Spritzprägen, Laserstrukturierung (in-line oder off-line)
- Streupartikel: direkte Einarbeitung in das Polymer (Compoundierung)

Da das Licht stets aus beiden Oberflächen der Lichtleitplatte ausgekoppelt wird, muss eine Seite der Flächenleuchte zusätzlich mit einer lichtreflektierenden Schicht – meist eine weiße Reflexionsfolie mit hohem Lichtreflexionsgrad – ausgestattet sein, um das rückseitig ausgekoppelte Licht nach vorne umzulenken. Als Material zur Herstellung von Lichtleitplatten hat sich PMMA aufgrund seiner hohen Transmission, geringen Reflektion und geringen Dispersion sowie der sehr guten Lichtleiteigenschaften (geringe optische Dämpfung, kaum Vergilbung und Haze) infolge der geringen Eigenabsorption des Polymers durchgesetzt [4]. Die Anforderungen an die Reinheit der eingesetzten Formmassen sind dabei als sehr hoch einzustufen. Mehrere in einem Stack angeordnete Spezialfolien (Prism Sheet/Film, BEF/DBEF, Micro Lens Film) sorgen dafür, dass Lichtverluste minimiert, die Bildhelligkeit erhöht und der Betrachtungswinkel des LCD Display optimiert werden (vgl. Bild 6) [4, 7].

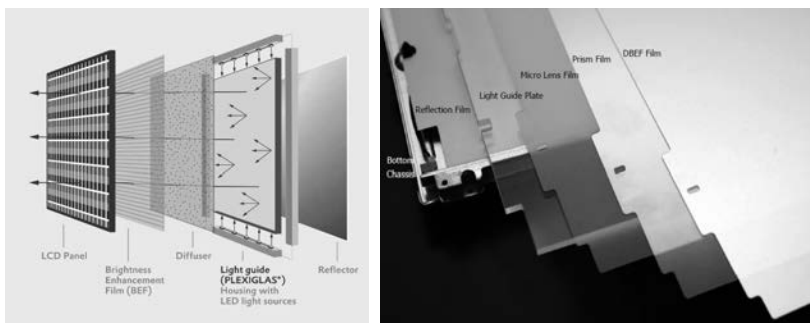


Bild 5: Aufbau und Komponenten einer Back Light Unit mit zweiseitiger Kantenbeleuchtung

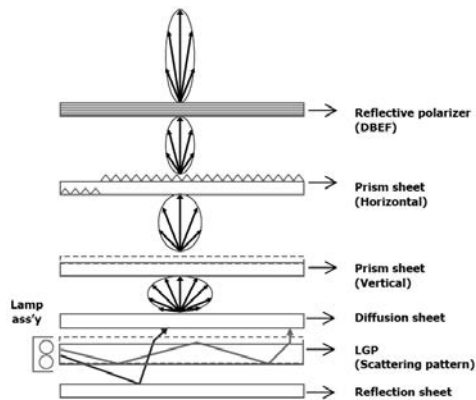


Bild 6: Wirkprinzip einer Back Light Unit mit Kantenbeleuchtung [4]

Während kleine und mittelgroße Lichtleitplatten bis zu einer Bildschirmdiagonalen von ca. 19" (also ca. 48 cm, PC-Monitorgröße) im Spritzprägeverfahren hergestellt werden, erfolgt die Produktion von großen Lichtleitplatten für Fernsehgeräte im Extrusionsprozess. Das Aufbringen der Lichtauskoppelstrukturen erfolgt meist off-line, jedoch bieten manche Verfahren auch die Möglichkeit der in-line Fertigung (siehe oben). Generell geht der Trend aufgrund schlanker Formfaktoren bei den Endgeräten zu immer dünneren Back Light Units (Dicke von 0,3 bis 0,5 mm). Somit wird die Herstellung über Spritzprägeverfahren immer herausfordernder und dünne extrudierte Platten und Folien gewinnen zunehmend an Bedeutung. Die erreichbaren Dicken von Lichtleitern (und damit automatisch auch die Dicke der Endgeräte) werden aktuell durch die Größe der verfügbaren LED's limitiert.

## 5. Kratzfeste Oberflächen für Touchanwendungen

Während sich heute die Zulieferkette für Lichtleitplatten und Back Light Units für Displayanwendungen im Consumer Electronics Bereich praktisch ausschließlich in Asien befindet [4], eröffnet die zunehmende Diffusion von Technologien und Innovationen auf dem Gebiet der Displaytechnik und Optoelektronik in andere Industrien und Anwendungen nun auch neue Chancen für Kunststoffverarbeiter und Zulieferer in Europa. Einer der Haupttreiber bei der Implementierung von neuen Innovationen in den Feldern Telematiksystemen, Displays zur Informationsvisualisierung, mobile Internetkonnektivität und Touchanwendungen als neues HMI (Human Machine Interface) Bedienkonzept ist dabei die Automobilindustrie (siehe Bild 7).

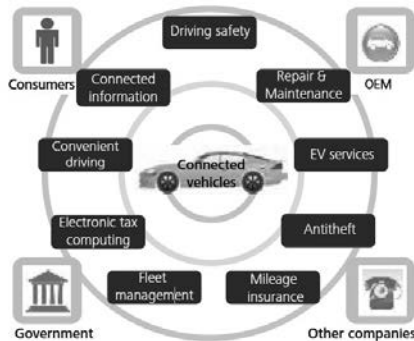


Bild 7: Fahrzeug-Konnektivität („connected cars“) – Mögliche Funktionen und Services [8]

Im Fahrzeugbereich schreitet die Integration von Displays in Kombination mit Touchbedien-elementen und -flächen in den letzten Jahren voran und wird weiter rasant zunehmen – das Marktwachstum wird für den Zeitraum 2014 bis 2018 auf nahezu 100% prognostiziert [9, 10]. Besonders in der Premium- und Oberklasse sollen neue Bedienkonzepte für die Instru-mentenanzeigen und das Infotainment-System einen Mehrwert hinsichtlich Fahrsicherheit, Qualitätsversprechen, Designanspruch und nicht zuletzt auch hinsichtlich dem Lebensgefühl bieten. Mercedes-Benz hat beispielsweise mit der Einführung der neuen C-Klasse (W205) im Jahr 2014 in der Mittelkonsole ein berührungsempfindliches Touchpad integriert (siehe Bild 8). Über dieses lässt sich das COMAND Online System (Navigation, Audio-System, Video, Internet und Freisprechfunktion) intuitiv über Gestensteuerung wie bei einem Smartphone bedienen und erhöht somit in Kombination mit haptischem Feedback die Sicherheit sowie den Bedienkomfort [11].



Bild 8: Das neuartige Mercedes-Benz Touchpad mit sphärischer Oberfläche zur Bedienung des COMAND Online System (Fotos: Daimler AG)

Die Daimler AG, Sindelfingen hat zusammen mit dem Zulieferer Continental AG, Babenhausen die Technik für diesen neuartigen Bediencontroller entwickelt und sich bei der Herstellung der sphärisch geformten Oberschale für die CoverForm®-Prozesstechnologie entschieden [12, 13]. Die Entscheidung für diese Technologie ergab sich aus den Anforderungen, die Hersteller und Kunden an das Touchpad stellten: Es musste als dreidimensionales Bauteil im Spritzgussverfahren zu fertigen sein und durfte auch nach intensiver Nutzung keine Kratzer oder chemisch bedingten Veränderungen an der Oberfläche zeigen. Im Vergleich mit am Markt erhältlichen alternativen Technologien zur Erzeugung hoch beanspruchter Oberflächen im Interieur-Bereich besticht die CoverForm®-Technologie aus Sicht des Kunden durch hervorragende Kratz- und Chemikalienbeständigkeit und die Möglichkeit der Darstellung von Freiformflächen mit integrierter Haptik oder Fühlhilfen in Glasoptik mit Tiefeneffekt (siehe Tabelle 2).

Ausgangspunkt der Entwicklung von CoverForm® war der hohe Anspruch an Kunststoffoberflächen in vielen Anwendungen: Auch wenn die Oberflächen durch mechanischen Abrieb oder Chemikalien wie Cremes oder Reinigungsmittel stark strapaziert werden, dürfen sie ihre ursprünglichen Materialeigenschaften nicht verändern. PMMA weist von allen thermoplastischen Werkstoffen zwar die höchste Oberflächenhärte und Kratzfestigkeit auf,

Tabelle 2: Auswahlmatrix für Materialien & Technologien zur Herstellung der Touchpad-Oberfläche [13, 14]

Criteria	Mineral Glass	Hard-coated Film Insert Technology	Injection Molding, Painting & Laser Technology	Film Insert, Overmolding & CoverForm®
Scratch Resistance	✗ / ✓	✓	✗	✓ ✓
Flexible Textures: high-gloss / matt-finished	✗	✗	✗	✓
Haptic Spots: points, partitions, areas	✗	✗	✓	✓
Glass-like Appearance: with depth effect	✓ ✓	✗	✗	✓
Costs	✗	✓	✗	✓
Free-form Surface	✗	✓	✓	✓
Chemical Resistance	✓ ✓	✓ ✓	✓	✓ ✓
Off-tool Parts: without post-processing	✗	✓ ✓	✓	✓ ✓
Micro-structuring Capability	✗	✗	✗	✓ ✓

aber dennoch müssen auch PMMA-Bauteile für besonders hohe Anforderungen durch eine zusätzliche Beschichtung vor Verkratzen und chemisch bedingtem Verschleiß geschützt werden. An das Spritzgießen des Bauteils schließt sich bei konventioneller Fertigung deswegen oftmals eine separate Flutbeschichtung in einer Lackierstraße an. Der Gesamtprozess umfasst dabei normalerweise 14 Schritte. CoverForm® dagegen kommt mit nur vier Prozessschritten aus, weil das PMMA direkt im Spritzgießwerkzeug mit einem Reaktivsystem überflutet wird. Dieses Überfluten im Werkzeug verlängert zwar die Zykluszeit im Vergleich zum Standardspritzgießen um ca. 10 bis 15 Sekunden, doch dafür entfallen viele nachgeordnete Schritte wie das Reinigen der Bauteiloberfläche oder Auftrag und Ablüften von Primer und Hardcoat. Das ermöglicht deutlich kompaktere Anlagen als beim klassischen Fertigungsverfahren. Das von Evonik für CoverForm® entwickelte Materialsystem besteht aus zwei Komponenten: der als Granulat vorliegenden Formmasse PLEXIGLAS® cf und dem flüssigen Reaktivsystem CoverForm® cf 30 oder cf 60 für die Kratzfestbeschichtung. Der Zusatz cf kennzeichnet PMMA-Formmassen, deren Formulierungen bestimmte Spezifikationen erfüllen müssen. Das Zweikomponenten-Reaktivsystem von CoverForm® besteht aus monomeren, multifunktionalen Acrylaten und einem thermischen Initiator und ist lösemittel- und siloxanfrei. Formmasse und Reaktivsystem bilden nach der Aushärtung im CoverForm®-Prozess ein stoffschlüssiges System ohne Phasengrenze, da das Reaktivsystem in das PMMA eindringt und durch chemische Vernetzung fest im PMMA verankert wird. Das Ausbleiben der bei nachträglichen Beschichtungsschritten üblichen Phasengrenze sowie die angepassten Brechungsindices von Reaktivsystem und PMMA verhindern, dass optische Interferenzen entstehen. Diese würden sich in unerwünschten Regenbogeneffekten auf der Oberfläche bemerkbar machen. Beim CoverForm® Prozess (Bild 9) wird das PMMA zunächst in die Kavität des Werkzeugs eingespritzt und geprägt. Nach einer kurzen Kühlphase wird die Kavität um wenige Zehntelmillimeter erweitert und die Beschichtungslösung mikrolitergenau injiziert, so dass sie das gesamte Spritzgießteil fluten kann. Es folgen eine Präge- und eine thermische Vernetzungsphase; im Anschluss kühlt die Anlage die Kavität ab. Das Formteil mit einer 10-50 µm dicken Funktionsschicht wird dann von einem Roboter entnommen und UVgehärtet. Durch diese nachträgliche UV-Härtung reduziert sich die thermische Vernetzung in der Spritzgießmaschine auf etwa eine Sekunde – die restlichen 10 bis 15 Sekunden, um die sich bei CoverForm® der Fertigungszyklus verlängert, sind für Aufheizen und Abkühlen des Werkzeugs erforderlich. Der gesamte Spritzgieß-/Spritzprägeprozess inklusive Kratzfestbeschichtung durch Flutung läuft in einer Maschine ab, was weltweit einzigartig ist. Die technischen Anforderungen sind dabei hoch – sei es an die Genauigkeit der Spaltmaße beim Aufziehen der Kavität für das Fluten des Bauteils oder an die dynamische Temperierung des

Werkzeugs und der Kavität. Das CoverForm® Verfahren lässt sich auch in Verbindung mit anderen Copolymeren wie ABS (Acrylnitril-Butadien-Styrol) oder ASA (Acrylester-Styrol-Acrylnitril) anwenden.

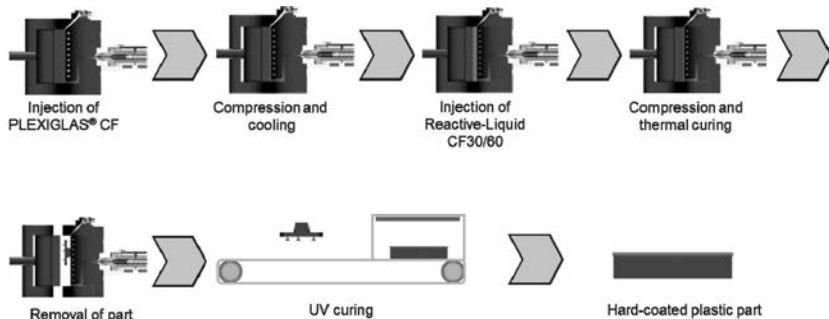


Bild 9: Schematischer Ablauf des CoverForm®-Prozesses [15]

Die CoverForm®-Prozesstechnologie wurde von Evonik in enger Zusammenarbeit mit dem Maschinenbau-Unternehmen KraussMaffei entwickelt und wird gemeinschaftlich im Markt vertrieben. Für einfache Pilotstudien oder Material- und Verfahrensversuche steht bei Evonik am Standort Darmstadt ein CoverForm®-Kompetenzzentrum zur Verfügung. Anfang Juli 2015 prämierte die Society of Plastic Engineers (SPE) das Mercedes Touchpad als kreativste und innovativste Lösung für den Fahrzeugbau in der Kategorie „Electronical/Optical Parts“ mit dem Grand Award. Mehr Informationen zur CoverForm®-Prozesstechnologie finden sich im Internet unter dem folgenden Link: [www.coverform-info.de](http://www.coverform-info.de).

## 6. Entspiegelte und kratzfeste Oberflächen für Displayabdeckungen

Sowohl bei Instrumenten- als auch bei Infotainmentdisplays kommt es aus Sicherheitsgründen auf eine blendfreie Sicht an. Als Stand der Technik werden transparente Abdeckungen aus Glas mit hochpräzisen Antireflexschichtsystemen eingesetzt. Dabei verfügen diese Abdeckgläser über eine sehr feine Oberflächenstruktur, die das auftreffende Licht streut (Antiglare-Effekt) und fallweise eine zusätzliche spezielle Beschichtung, die die Helligkeit verringert (Antireflex-Effekt). Die Streueigenschaften der Mikrostruktur sind so einzustellen, dass das auftreffende Licht möglichst weit gestreut wird, die Informationen des dahinterliegenden Displays dabei aber immer noch zu lesen sind. Aus diesem Grund werden Transmissionswerte von mehr als 98%, Reflexionswerte kleiner 1% sowie Glanzgrade bei 60° von 80 bis 110 gefordert [16].

Während Antiglare-Strukturen in mineralischen Abdeckgläsern durch einen speziellen Ätzprozess erzeugt werden können, gab es für Kunststoffabdeckgläser bisher kein geeignetes Verfahren zur Herstellung robuster, vor allem kratz- und chemikalienbeständiger Mikrostrukturen mit Antiglare-Wirkung. Das Spritzgießen von Kunststoff ermöglicht zwar die Herstellung von strukturierten Oberflächen, jedoch sind die gewählten polymeren Werkstoffe zu kratzempfindlich oder es lassen sich aufgrund der rheologischen Eigenschaften keine Mikrostrukturen mit der geforderten Exaktheit abformen. Das nachträgliche Beschichten von im Spritzprägeprozess erzeugten Oberflächenstrukturen scheidet aus, da die feinen Texturen durch den aufgetragenen Kratzfestlack wieder aufgefüllt werden und somit die Präzision verloren geht.

Der Glasveredelungsspezialist Flabeg Deutschland GmbH, Nürnberg konnte in einer zusammen mit Evonik und KraussMaffei durchgeführten Studie [16] zeigen, dass sich mit der CoverForm®-Prozesstechnologie das Problem lösen lässt: mit der CoverForm®-Technologie können die im Werkzeugeinsatz eingearbeiteten Mikrostrukturen zur Erzeugung einer Antiglare-Funktion mit einer sehr hohen Abbildegenauigkeit in die Kratzfestschicht des Spritzlings übertragen werden. Die Rauigkeitswerte ( $R_a$ ) der Werkzeugeinsatz-Oberfläche von  $R_a = 0,07 \mu\text{m}$  finden sich fast verlustfrei wieder in der CoverForm®-Oberfläche mit  $R_a = 0,06 \mu\text{m}$ , während die Abbildung in eine reine PMMA-Oberfläche nur einen Rauigkeitswert von  $R_a = 0,03 \mu\text{m}$  liefert. Der Grund hierfür ist die niedrige Viskosität des CoverForm®-Lacksystems auf Acrylatbasis von 22 mPa·s bei Raumtemperatur, die dazu führt, dass die Werkzeugtextur sehr gut geflutet und damit abgebildet wird. Demgegenüber ist die Schmelzeviskosität von Thermoplasten um den Faktor  $10^5$  bis  $10^6$  höher, wodurch die abzubildenden Struktur tiefen stark geglättet werden. Nach zusätzlicher Beschichtung der so erhaltenen sehr kratz- und chemikalienbeständigen Antiglare-Oberfläche mittels PVD-Verfahren (physical vapor deposition) wird eine sehr harte anorganische Antireflexionsschicht aufgebracht, die Reflexionsgrade unter 1% liefert. Diese hat sich zudem als ebenso kratz- und chemikalienbeständig erwiesen. Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass man mit dem CoverForm®-Verfahren eine reflexionsfreie Abdeckscheibe auf Basis von PMMA in Ätzglasqualität herstellen kann. Künftig können solche Kunststoffabdeckungen vor allem auch für touchfähige Displays eingesetzt werden, insbesondere wenn diese eine 3D-Form aufweisen sollen, die in Glas nur sehr schwer zu realisieren ist.

## Literatur

- [1] V. Jakhanwal: „Shipments of AMOLED TV Panels will be limited for the next few years“, Information Display, 3/2013, S. 42-44
- [2] TDMDA Report: „Flat Panel Display and Key Component Summary Report“, April 2015
- [3] H. Groothues: „Dreidimensionale Erleuchtung“, KUNSTSTOFFE, 11/2015, S. 88-90
- [4] Displaybank Industry Issue Report: „2012 LED LCD TV-use LGP“, 2011
- [5] D. DeAgazio: „Thin is in: LED Backlight Units are becoming thinner and brighter to meet consumer-product requirements“, Information Display, 2/2009, S. 16-20
- [6] J. Langevin, K. de Berti: „LED backlight technology offers promising choice for lighting“, LEDs Magazine, Nov/Dec 2011
- [7] A. Bastawros, J. Zhou, M.J. Davis, Z. Chen, W. Harsono: „Diffuser films and optical performance in LCDs“, Information Display, 1/2012, S. 20-24
- [8] Deloitte China Automotive Practice Report: „Trends and outlook of the auto electronics industry“, 2013
- [9] IHS Report: „Automotive Displays Market Report“, 2012
- [10] C. Hsieh: „Touch Panel Market: Applications & Evolution“, C-TOUCH Touch Screen Tech Forum, Shenzhen, China, November 2014
- [11] T. Weckerle, C. Böhle, U. Gärtner, M. Boll, D. Fuhrmann: „Mehr Klasse denn je“, ATZ extra, Mai 2014, S. 28-35
- [12] A. Schmidt, S. Schröbel, S. Wagner: „Kratzfeste 3D-Touchflächen“, Evonik Quarterly Science Newsletter, ELEMENTS 51, 2/2015, S. 6-11
- [13] U. Gayer, B. Klein, S. Schröbel: „Vom Design bis zur Serie“, KUNSTSTOFFE, 11/2015, S. 92-96
- [14] U. Gayer: „Die Kunststofftechnologien des neuen Mercedes-Benz Touchpad“, VDI-Kongress Kunststoffe im Automobilbau, Mannheim, März 2015
- [15] S. Schröbel, A. Schmidt, T. Hörl, M. Eichlseder: „Kratzfest in einem Schritt“, KUNSTSTOFFE, 1/2010, S. 52-55
- [16] T. Höing, S. Schröbel, B. Walder: „Kratzfest und Entspiegelt“, KUNSTSTOFFE, 3/2013, S. 66-72



# Trends und Strategien zur Individualisierung des Automobilinterieurs

Dipl.-Wirtsch.-Ing. **I. Erler**,

Yanfeng Europe Automotive Interior Systems Limited & Co. KG, Neuss

## Kurzfassung

Der Trend zu individuelleren Oberflächen im Automobilinterieur gewinnt zunehmend an Bedeutung und hat eine Reihe von Lösungen hervorgebracht, die eine gewisse Anpassbarkeit der Oberflächen während der Fertigung oder während der Fahrzeugnutzung ermöglichen. In vielen Fällen ist dieses Potenzial allerdings durch die mit der Variantenbildung verbundenen höheren Kosten und komplexeren Fertigungsprozessen eingeschränkt. Daher wird bei Yanfeng Automotive Interiors kontinuierlich an neuen Technologien gearbeitet, die entweder ein höheres Individualisierungspotenzial ausschöpfen oder eine hohe Variantenbildung zu niedrigeren Kosten bieten. Beispielhaft sei hier das Hinterspritzen und Hinterschäumen von Leder, das Hinterleuchten von perforierten Lederoberflächen und die individualisierte Lasergravur auf Lederoberflächen genannt. Durch die Kombination des Spritzgießprozesses mit den additiven Technologien kann zudem die hohe Effizienz des Spritzgießprozesses um das hohe Individualisierungspotenzial des „Additive Manufacturing“ ergänzt werden. Das Aufdrucken auf standardisierten spritzgegossenen Kunststoffoberflächen eröffnet somit komplett neue Designmöglichkeiten und Individualisierungsstrategien für Interieurbauteile.

## Abstract

The tendency towards more individual surfaces in the automotive interior is gaining further importance and has evolved a number of solutions, which allow a certain adaptability of surfaces during manufacturing or by the car user. In most cases that potential is limited by increasing costs and manufacturing complexity which come with variants. Accordingly, at Yanfeng Automotive Interiors we continuously work on new and advanced technologies, which either allow a higher degree of individualization or more variants at lower costs. For example the back injection molding and back foaming of leather, backlit perforated leather and individualized laser engraving on leather are mentioned. By combining injection molding and additive manufacturing, the high potential of individualization by additive manufacturing can be added to the high efficiency of injection molding. Accordingly, the printing on top of standardized injection molded part surfaces thus opens up completely new design capabilities and individualization strategies for interior parts.

## 1. Yanfeng Automotive Interiors (YFAI)

Im Juli 2015 legten Yanfeng Automotive Trim Systems Co., Ltd., einer hundertprozentigen Tochtergesellschaft des zur SAIC Motor Corporation Limited (SAIC Motor) gehörenden Komponentenherstellers Huayu Automotive Systems Co., Ltd. (HASCO), und das internationale Multiindustriunternehmen Johnson Controls ihre Automotive Interiors Aktivitäten in einem Joint Venture zusammen. Dadurch entstand der global agierende und weltweit größte Automobilzulieferer für Automobilinnenausstattung Yanfeng Automotive Interiors (YFAI) mit Hauptsitz in Shanghai. Mit weltweit ca. 28 000 Mitarbeitern und über 90 Werken in 17 Länder können OEMs auf allen relevanten Märkten mit Türverkleidungen, Mittelkonsolen, Instrumententafeln, kompletten Cockpitsystemen und Dachbedieneinheiten beliefert werden.

Die Abteilung „Advanced Product Development & Sales“ (APDS) ist in YFAI u. a. für die Entwicklung innovativer Technologien, Prozesse und Produkte verantwortlich und erarbeitet Visionen des Automobilinterieurs der Zukunft. Mit mehr 130 Mitarbeitern und 3 Innovationszentren in den USA, China und Deutschland konnte eine interdisziplinäre cross-funktionale Organisation geschaffen werden, dessen Ziel es ist, das Fahrerlebnis durch innovative Interieurkonzepte zu stärken.

## 2. Dekorative Elemente zur Individualisierung des Automobilinnenraums

Dekorative Elemente, welche die Wertigkeit des Interieurs hervorheben sollen, sind auf spezifische im direkten Sichtbereich der Insassen reduzierte Flächen, die sich durch eine besondere Gestaltung von der Umgebung abheben, wie Bild 1 dargestellt. Dabei handelt es sich zumeist um Blenden, Dekostreifen und austauschbare Einsätze. Hauptfunktion dieser Dekoelemente sind die Verbesserung der Optik und Haptik, die Steigerung der wahrgenommenen Wertigkeit des Interieurs sowie die Integration zusätzlicher Unterscheidungsmerkmale. Unterschiedliche Technologien kommen zum Einsatz, um entsprechende Gestaltungselemente umzusetzen. Je nach Anforderungen können In-Mold-Lamination (IML), In-Mold-Decoration (IMD), variotherme Temperierung, Lackieren, Metallisieren/Verchromen von Oberflächen, Mold-In-Color (IMC), Hinterspritzen von Dekoelementen (Holz, Textilien) und Heißprägen zum Einsatz kommen.



Bild 1: Dekorative Elemente im Automobilinnenraum

### 3. Grundsätzliche Trends in der Individualisierung des Automobilinnenraums

Derzeit zeichnen sich unterschiedliche Trends hin zu einer verstärkten Individualisierung des Automobil-Interieurs ab. Häufig eingesetzt werden Dekoelemente als Differenzierungsmerkmal unterschiedlicher Ausstattungsklassen. Der Kunde kann zwischen unterschiedlichen Oberflächenmaterialien wählen (beispielsweise Folie, Textil oder Leder). Erste Ansätze gehen auch in die Richtung der Wahl unterschiedlicher vordefinierter Muster oder Farben für spezifische Sichtflächen durch den Endkonsumenten. Entsprechend eingefärbte oder strukturierte Folien werden im Spritzgießwerkzeug hinterspritzt. Ein Wechsel der Folie ist Rolle-zu-Rolle oder durch den Wechsel der vorgeformten Folie möglich.

Ein größeres Individualisierungspotential ermöglichen individuell bedruckte Folien, welche z. B. im In-Mold-Graining (IMG) oder einem anderen Kaschierverfahren mit dem Trägerbauteil verbunden werden. Ein ähnliches Konzept wurde bereits von Toyota vorgestellt. Schwierigkeiten kann beim Kaschieren die Überdehnung und damit die Verzerrung des aufgedruckten Logos bereiten. Skoda bietet für den Fabia die Verwendung von individuell bedruckten Folien an, welche im Rahmen des Aftermarket-Geschäfts auf vordefinierte Sichtflächen aufgeklebt werden.

Zunehmende Bedeutung gewinnt das Thema Beleuchtung des automobilen Innenraumes. Insbesondere im Oberklassesegment und zunehmend auch in der Mittelklasse werden Beleuchtungselemente eingesetzt um neue Akzente zu setzen (siehe Bild 2). Je nach Fahrzeugvariante kann die Beleuchtung an die individuellen Bedürfnisse des Nutzers angepasst werden. Dazu kann die Beleuchtungsstärke oder die Farbe in einem vorgegebenen Rahmen durch den Nutzer verändert werden.



Bild 2: Die Innenraumbelichtung gewinnt als Unterscheidungsmerkmal zunehmend an Bedeutung

Die dargestellten Trends erlauben bereits zu einem gewissen Grad die Anpassung des Automobilinterieurs. Allerdings wird der Freiraum der Individualisierung durch den Endkonsumenten durch die vordefinierten Varianten eingeschränkt, welche für spezifische Sichtflächen zur Verfügung stehen. Diese Einschränkung ist der Ursache geschuldet, dass ein steigender Variantenreichtum häufig mit einer erhöhten Prozesskomplexität und einer Kostensteigerung einher geht.

#### 4. Technologieentwicklungen bei YFAI hin zu mehr Individualisierung im Automobilinnenraum

Bei YFAI wird an unterschiedlichen Technologien gearbeitet, mit dem Ziel, das Interieurdesign stärker an den individuellen Bedürfnissen des Nutzers auszurichten. Eine Auswahl dieser Technologien soll im Folgenden vorgestellt werden.

Hinterleuchtetes perforiertes Leder ermöglicht die großflächige Ausleuchtung von beispielsweise Türverkleidungen, wie in Bild 3 dargestellt. Dazu werden in das Lederkleid an definierten Stellen Löcher gestanzt. Zwischen dem Trägerbauteil und dem perforierten Lederkleid mit Abstandsgewebe wird ein Lichtleitergewebe platziert, welches die Fläche gleichmäßig ausleuchtet. Das Licht tritt durch die Löcher in den Innenraum ein. Dadurch lassen sich individuell einstellbare Lichteffekte erzielen, die durch eine dynamische Steuerung der Lichtleiter auch sich farblich ändernde Bilder ermöglichen. Alternativ können die Lichtleiter auch in eine textile Sichtfläche eingewebt werden. Anschließend wird das Textil mit einem Abstandshalter und dem Kunststoffträger verklebt. Die Auskopplung des Lichtes aus den Lichtleitern erfolgt flexibel an den gewünschten Stellen mittels eines speziellen Aktivierungsverfahrens. Dadurch ergibt sich ein individuell einstellbares Beleuchtungsmuster auf Verkleidungselementen.



Bild 3: Hinterleuchtetes perforiertes Leder (Illustration).

Weitere Möglichkeiten individualisierter Lederoberflächen ergeben sich mittels Lasergravieren. Dabei wird mittels eines Lasers die Lackschicht auf der Lederoberfläche erhitzt ohne dabei die Schutzwirkung des Lackes zu zerstören. Mittels des dadurch initiierten Vernetzungsvorgangs in der Deckschicht können auf dem Leder Farbumschläge auf der Lederoberfläche hervorgerufen werden (Bild 4). Die Variation der Laserintensität ermöglicht zudem die Abstufung in Graustufen. Durch den flexiblen Einsatz des Lasers lassen sich vielfältige Muster, Logos und Symbole entsprechend den individuellen Bedürfnissen des Nutzers auf der Lederoberfläche einbringen.



Bild 4: Individualisierte Lasergravur auf einer Lederoberfläche

Bisher müssen hochwertige Interieurbauteile in einem zweiten Schritt mit Leder kaschiert werden. Bei YFAI wird an einem Prozess gearbeitet, der es ermöglicht, den Grundträger direkt im Spritzgießwerkzeug zu kaschieren und gleichzeitig individuelle Oberflächenmuster in die Lederoberfläche einzubringen (Bild 5). Dazu wird das Lederkleid in das Spritzgießwerkzeug eingelegt und mit Schmelze hinterspritzt. Durch den Spritzdruck wird die endgültige Form der Lederoberfläche vorgegeben. Aufgrund des hohen Spritzdruckes kann bisher kein Soft-Touch Effekt integriert werden. Durch die Definition von Werkzeugeinsätzen im Bereich der Kavität können kundenindividuelle Oberflächenstrukturen auf der Lederoberfläche umgesetzt werden und somit ein zusätzliches Individualisierungspotenzial mittels dieser Techno-

logie gehoben werden. Diese Werkzeugeinsätze lassen sich bei geöffnetem Spritzgießwerkzeug einfach und schnell auswechseln. Gleichzeitig werden die Prozesskosten gegenüber der konventionellen Kaschierbearbeitung mit Leder reduziert und Radien kleiner 1 mm können wahrscheinlich abgebildet werden. Das Projekt befindet sich noch in der Entwicklung.

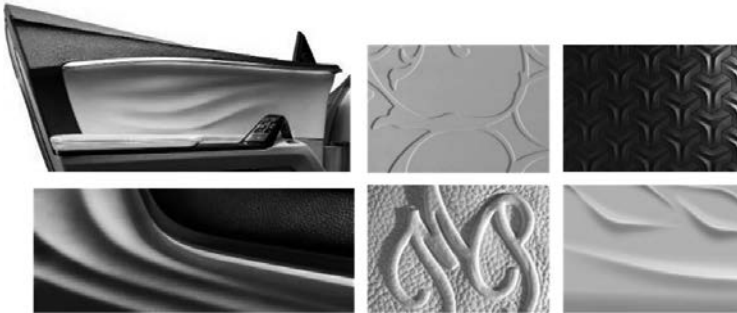


Bild 5: Lederkaschieren im Spritzgießwerkzeug durch Hinterspritzen.

Für viele Modellreihen werden, wie oben erwähnt, unterschiedliche Ausstattungsvarianten angeboten. Während die Basis-Version einer Instrumententafel oft mit einer Slush- oder TPO-Haut kaschiert wird, wird für die High-End Version häufig ein Lederkleid mit einem Abstandsgewirke (Spacer) von 3 mm Dicke verwendet. Dies führt dazu, dass die günstigere geschäumte Basisversion dicker ist, als die mit Leder kaschierte High-End Version mit dem Abstandsgewirke und einer geringeren Gesamtdicke. Folglich müssen bisher in der Regel für beide Version zwei unabhängige Produktionslinien gefahren werden.

YFAI hat daher einen Prozess entwickelt, der es erstmalig ermöglicht, ein Lederkleid direkt im Schäumwerkzeug bei 60 °C Kaschiertemperatur (gegenüber konventionell 80 °C) zu hinterschäumen. Zusammen mit dem gleichmäßigen Aufschäumdruck kann das Leder deutlich schonender verarbeitet werden. Durch den Einsatz einer dünnen Schutzfolie kann im Bereich der Nähte ein Durchschäumen verhindert werden. Der Schaum übernimmt dabei die Funktion des Abstandsgewirkes (Bild 6). Das Vorgehen erlaubt die Verwendung einer Produktionslinie für beide Ausstattungsvarianten. Gegenüber dem bisherigen Vorgehen wird nur eine Trägergeometrie für beide Varianten verwendet. Der Kaschierprozess mit der Leder- oder Slush-Haut erfolgt anschließend im Schäumwerkzeug unter Ausnutzung der exothermen Reaktion des Schaumes (das Werkzeug wird bei ca 50 °C gefahren). Ein zusätzliches aufwendiges Verkleben von Träger, Abstandsgewirke und Lederkleid entfällt und es können durch den Schaum deutlich gleichmäßigere Hart/Weich-Übergänge mit verbesserter Haptik erzielt werden. Somit kann dem Kunden eine Variantenvielfalt bei deutlich reduzierten Kosten geboten werden.

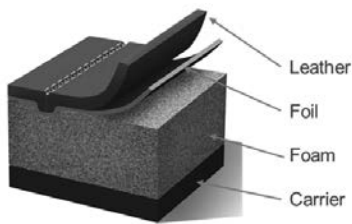


Bild 6: Hinterschäumen von Leder

Die dargestellten Technologien zeigen auf, wie eine hohe Variantenvielfalt bei fallenden oder gleichbleibenden Kosten oder sogar eine Individualisierung von Automobil-Interieurbauteilen möglich ist. Dabei sind allerdings insbesondere die Möglichkeiten einer Kunden-spezifischen Gestaltung des Interieurs noch stark eingeschränkt und reuzieren sich bisher auf 2-D-Abbildungen.

## 5. Kombination von Spritzguss und Additive Manufacturing

Die Technologien des „Additive Manufacturing“ (AM, „3D printing“) erlauben heute bereits eine individuelle Gestaltung und Fertigung von Bauteilen in Losgröße 1 und können daher in Zukunft das Individualisierungspotenzial auf die vollständige 3-D-Geometrie ausweiten. Diese Technologien sind aktuell auf dem Sprung, ihr Einsatzspektrum von der reinen Prototypenfertigung auf die Serienproduktion auszuweiten. Bekannte Erfolgsbeispiele kommen aus der Medizintechnik und der Luftfahrt. Allerdings zeigen die AM-Technologien insbesondere in der Verarbeitung von Kunststoffen bisher noch deutliche Schwächen, die einen Serieneinsatz in der Automobilindustrie einschränken. Dazu gehören u. a. eine noch geringe Reproduzierbarkeit der Bauteileigenschaften, eine geringe Druckgeschwindigkeit verbunden mit vergleichsweise hohen Herstellungskosten sowie ausgeprägt anisotrope mechanische Bauteileigenschaften, welche eine Bauteilauslegung erschweren.

Aufgrund des hohen Kosten- und Zeitdrucks sowie den zu fertigenden hohen Stückzahlen in der Automobilindustrie kann bisher auf den Spritzgießprozess nicht verzichtet werden. Um dennoch das hohe Individualisierungspotenzial zu heben, welches mit den AM Verfahren verbunden ist, könnte die geeignete Kombination beider Technologien das maximale Niveau an Individualität durch AM mit der hohen Effizienz und Reproduzierbarkeit beim Spritzgießen vereinen. Dazu wird ein spritzgegossener standardisierter Träger in einem zweiten Prozessschritt einer Individualisierungszelle zugeführt werden, wie in Bild 7 dargestellt. Hier kann beispielsweise das Strangablageverfahren verwendet werden, auch bekannt als „Fused Deposition Modelling“(FDM) oder „Fused Filament Fabrication“ (FFF). Entweder das Bauteil wird unter der stationären Extrusionsdüse hindurchgeführt oder ein Roboter führt die Extrusi-

onsdüse über das fixierte Bauteil. Dadurch kann entsprechend des Kundenwunsches lokal Material unterschiedlicher Farbe und evtl. Weichheitsgrades aufgetragen und eine kundenindividuelle 3-D-Struktur aufgebaut werden. Vorteil dieser Herangehensweise ist, dass der additive Materialauftrag auf ein Minimum reduziert wird, was die Zeitverlängerung des Prozesses reduziert. Außerdem werden die mechanischen Bauteileigenschaften durch den spritzgegossenen Grundträger bereit gestellt. Da gedruckte Oberflächen häufig den Qualitätsanforderungen der Automobilindustrie nicht genügen, kann zusätzlich mittels Fräser im selben Prozessschritt eine unmittelbare Glättung der Oberfläche erfolgen. Im Metalldruck wurde dies bereits erfolgreich erprobt.



Bild 7: Kombination von Spritzguss und Additive Manufacturing.

Ein ähnliches Konzept wurde beispielsweise von der Firma Arburg GmbH & Co KG, Loßburg, bereits erfolgreich vorgestellt. In ihrem Ansatz werden spritzgegossene Bauteile (Lichtschalter, Schere) einem „Freeformer“ zugeführt und mit einem individuellen Schriftzug versehen. Die Kommunikation zwischen Spritzgießmaschine und Drucker erfolgt über Ansätze die aus „Industrie 4.0“ bekannt sind.

Beide beschriebene Hergehensweisen eröffnen vollkommen neue Designmöglichkeiten für Automobilinterieurbauteile, sind jedoch auf nicht sicherheitsrelevante Oberflächen begrenzt. Sie ermöglichen sogar die direkte Partizipation des Nutzers bei der Gestaltung seines Fahrzeuginnenraumes.

Erste Versuchsergebnisse zeigen bereits einige Möglichkeiten und Einschränkungen auf, die mit diesem Ansatz verbunden sind. Dazu wurde mit einem Cube Pro Duo FDM Drucker mit ABS auf Talkum-gefüllte ABS Platten aufgedruckt. Bei dem Gerät handelt es sich um einen Hobbydrucker der unteren Preisklasse, was auch in einer geringen Reproduzierbarkeit der Druckergebnisse sichtbar wird. Auf die beschriebene Weise konnten Muster, wie in Bild 8 sichtbar, auf den 200 mal 150 mm großen Platten aufgedruckt werden. Die aufgedruckten Muster hatten eine Wanddicke von 0,8 mm. Es konnte keine Ablösung des aufgedruckten ABS vom Substrat beobachtet werden. Allerdings wurden bisher keine Abschalttests durchgeführt um die Haftfestigkeit zu ermitteln.



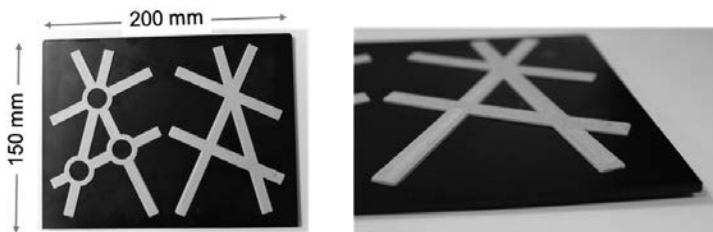


Bild 8: Beispiel aufgedruckter Muster auf ABS-Platten.

Weitere Tests an Mustern mit variierender Wanddicke zeigen dagegen, dass mit steigender Wanddicke auch das Risiko für eine Delamination vom Substrat steigt. Dies gilt insbesondere für Wanddicken ab 2 mm. Auch konnte ein Verzug der Grundplatte bei allen Versuchen beobachtet werden.

Insgesamt weist die Strangablage von Kunststoffen ein höheres Schwindungspotenzial auf als im Spritzgießprozess. Dies lässt sich in einem  $p_vT$ -Diagramm veranschaulichen. Während beim Spritzgießen ein Teil der Schwindung durch den hohen Nachdruck kompensiert werden kann, bewegt sich das Material beim Strangablegen immer auf der Isobaren für Umgebungsdruck. Das höhere Schwindungspotenzial könnte aber theoretisch bei der Planung des Druckauftrages in der Software kompensiert werden, indem in Bereichen höherer Schwindung zusätzliche Schichten Material aufgetragen werden.

Bauteilverzug und damit eine Ablösung des aufgedruckten Materials vom Substrat (Delamination) wird im Wesentlichen durch die Bauteilspannungen hervorgerufen. Diese werden wiederum u. a. durch inhomogene Bauteilschwindung verstärkt. Aufgrund des schichtweisen Materialauftrages entsteht über der aufgedruckten Bauteilwanddicke ein inhomogenes Temperaturprofil mit den höchsten Temperaturen auf der Düsenseite, was lokal unterschiedliche Schwindungseigenschaften hervorruft. Damit kann eine Verzugstendenz des gedruckten Formteils zur Düse hin begründet werden. Aufgrund der geringen Haftfestigkeit zum Substrat tritt ab einem bestimmten Spannungsniveau (welches u. a. mit der Wanddicke steigt) eine Delamination auf.

Die Haftfestigkeit zum Substrat kann auf unterschiedliche Weise beeinflusst werden. Ausschlaggebend für die Haftfestigkeit ist beispielsweise die Wahl der Materialkombination von Substrat und aufgedrucktem Werkstoff. Weiterhin können die Oberflächeneigenschaften des Substrates gezielt beeinflusst werden, indem die Oberfläche beispielsweise gezielt angeraut oder aktiviert wird. Eine weitere Möglichkeit besteht in der Einstellung und Regelung der Prozesstemperatur (Druckerraum und Ablegetemperatur des Strangs) sowie einem Vorheizen des Substrates. Weiterhin denkbar sind der Einsatz eines Haftvermittlers und die Einstellung des Abstandes zwischen Düse und Substrat.

Gerade was die Erhöhung der Temperatur des Druckraumes oder eine Vorheizung des Substrates betrifft, ist zu beachten, dass diese beschleunigte Relaxationserscheinungen und einen Verzug des Substrats hervorrufen können. Dies wurde bei allen Versuchen mit unverstärkten ABS Platten beobachtet, wobei der Bauraum für ABS auf ca. 60 °C temperiert war.

Aus den Erkenntnissen zeigt sich, dass nur kompatible Kunststoffe verwendet werden sollten, wobei das Substrat verstärkt sein sollte, um einen möglichen Verzug infolge der Temperatureinwirkung zu minimieren. Gleichzeitig sollte während des Druckes die Temperaturdifferenz im Bauteil möglichst minimiert werden, indem beispielsweise der Bauraum so hoch wie möglich geheizt wird und das verdruckte Material möglichst schnell mittels Lüftern herunter gekühlt wird. Auch kann es sinnvoll sein das Substrat vorzuheizen, um den Diffusionsprozess der Molekülketten beim Verschweißen in der Grenzschicht zu beschleunigen. Bisher deuten die ersten Versuche darauf hin, dass ein dünner Materialauftrag generell weniger zu Verzug und Delamination neigt.

## **6. Ausblick**

Wie gezeigt wurde, gibt es einen Trend hin zu einer verstärkten Differenzierung und Individualisierung des Automobilinnenraumes. Der damit einhergehende zusätzliche Kostenaspekt reduziert allerdings bisher das bestehende Differenzierungspotenzial. Es ist davon auszugehen, dass autonomes Fahren und „Shared Mobility“ den Individualisierungstrend in Zukunft weitere verstärken werden, indem Fahrzeuge zunehmend als Aufenthalts- und Erholungsort dienen bzw. heterogene Nutzergruppen auf ein gemeinsames Pool von Fahrzeugen zugreifen.

Es wurden Lösungsansätze aufgezeigt, wie bereits heute eine teilweise hohe Variantenbildung im Interieurdesign möglich ist. Der Weg hin zu einer wirklichen Individualisierung ist allerdings bei den heute existierenden Technologien und deren Kostenstruktur noch weit. Daher arbeitet YFAI an der Entwicklung verschiedener Technologien, entweder ein zusätzliches Individualisierungspotenzial heben oder eine steigende Variantenbildung zu niedrigeren Kosten bieten können. Eine Auswahl dieser Entwicklungen wurde oben aufgeführt.

Hervorzuheben ist in diesem Zusammenhang die Verwendung des „Additive Manufacturing“ in Kombination mit dem Spritzgießprozess. Diese kann in Zukunft die hohe Effizienz des Spritzgießprozesses mit dem Individualisierungspotenzial des AM verknüpfen, bei gleichzeitiger Kompensation der Nachteile, die sich heute bei additiv gefertigten Bauteilen ergeben. Das beschriebene Vorgehen erlaubt die Anpassung standardisierter Spritzgussbauteile um kundenindividuelle 3-D-Strukturen.

# 3D Barrier Coating

## Markt für kostengünstige Long-Shelf-Life-Verpackung öffnet sich für Spritzgießer

W. Czizegg, Cavonic GmbH, Engen

### Kurzfassung

3D Barrier Coating für Spritzgießprodukte: Im Vortrag wird das Verfahren erklärt, die erzielbaren Barriere-Eigenschaften erläutert und praktische Anwendungsbeispiele vorgestellt.

### Abstract (optional)

3D barrier coating für injection molding: the speaker explains the coating process, introduces into the achievable barrier properties and illustrates it with practical application samples.

### 1. Wie funktioniert das Verfahren ?

Das 3D Barrier Coating verbindet zwei klassische Produktionsverfahren und schafft damit eine neue Produktkategorie; herkömmliche Kunststoffbecher werden mit einer Barrierschicht versehen, die damit zum Barrierebehälter werden. Konkret wird durch geeignete Synchronisation schneller Spritzguss-Zyklen für z.B. Dünnwand-Behälter mit einem relativ langsameren, batchweisen PeCVD-Prozess aus einer normalen Food-Verpackung ein Barriere-Behälter gewonnen, der verderblicher Ware ein langes Shelf Life ermöglicht. Der Prozess ist umweltfreundlich, energie- und materialsparend.

### 2. Welche Barriere-Eigenschaften sind zu erzielen ?

In diesem Verfahren wird eine extrem dünne, flexible Schicht mit glasähnlichen Barriere-Eigenschaften auf die Kunststoffoberflächen abgeschieden, die eine Migration von Gasen, Wasserdampf wie auch anderen chemischen Elementen aus dem oder in den Kunststoff nahezu unterbindet.

Dies stellt einen wirksamen Schutz vor O<sub>2</sub>-Migration in das Lebensmittel dar, ebenso werden hygroskopische Füllgüter vor Verklumpen durch Wasserdampf geschützt. Mindestens ebenso wichtig ist der einhergehende Geschmacks- und Konsumentenschutz, da auch keine chemischen Elemente aus dem Kunststoff (z.B. Wachse, Lösemittel) oder auch aus Druckfarben in das Füllgut eindringen können. Zuletzt sei erwähnt, dass mit derartigen Schichten

auch ein Aromaschutz erzielt wird, da auch in Gegenrichtung keine flüchtigen Aromen und auch keine ätherischen Öle abwandern können.

### 3. Welche Anwendungen ?

Die Anwendungen im Food-Sektor sind vielfältig, beginnend bei verderblichen Fleisch- und Fischprodukten, über geschmacksempfindliche Milchprodukte mit hohem Fett-Anteil, bis hin zu fruchtbasierten Produkten, die durch Sauerstoff-Barriere ihre kräftig frische Farbe behalten.

Darüber hinaus bieten das Feld der Medizintechnik wie auch verschiedene technische Bereiche zahlreiche Anwendungsfelder bereit.

### 4. Vergleich zu alternativen Technologien

Als klassischer Wettbewerb sind die EVOH-Alternativen im Tiefziehen (zB. Mehrschicht-Aufbau mit Haftvermittler) sowie im Spritzguss zu betrachten, wie auch Glas und Weißblech- oder Aludose.

#### Barrierevergleich EVOH vs. CAVONIUM®

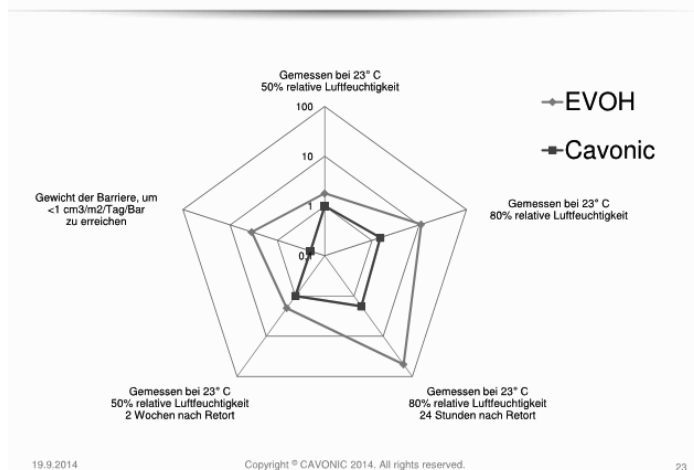


Bild 1: Performance-Vergleich von EVOH-Coinjection zu 3D Barrier Coating (Cavonic) bei unterschiedlichen Umgebungskonditionen

Im Vergleich zu den EVOH-basierenden Technologien weist das 3D Barrier Coating ein auffallend breiteres Barriere-Spektrum auf, das – anders als EVOH – weit über eine reine Gasbarriere hinaus geht. Zudem sind Themen wie Retort-Shock, Wasserdampf- oder Wärmeeinfluss bei dem 3D Barrier Coating völlig unkritisch; bei EVOH-Lösungen fällt bei diesen Einflüssen die Barrierewirkung nahezu komplett aus.

Darüber hinaus bietet das 3D Barrier Coating weitere einzigartige: Geschmacksschutz für das Füllgut, Bewahrung von flüchtigen Aromen und ätherischen Ölen im Füllgut, erhöhter Verbraucherschutz im Vergleich zu EVOH-Varianten. Und Kunststoffverpackungen mit 3D Barrier Coating sind im Gegensatz zu EVOH-Varianten als Monomaterial einfach recycelbar.

Anders als Gläser sind Kunststoffbecher mit 3D Barrier Coating unzerbrechlich, können nicht splintern, sind in der Herstellung wesentlich kostengünstiger, und erlaubt einen deutlich größeren Freiheitsgrad in den Geometrien und integrierten Funktionalitäten.

Anwendungsfelder finden sich heute vornehmlich im Bereich der Verpackung, wie auch bei medizintechnischen Anwendungen.



# Realisierbare Werkzeuge mittels additiver Fertigungsstrategien

Dipl.-Physiker **R. Derntl**, Hermle Maschinenbau GmbH, Ottobrunn

## Inhalt

- Firmenvorstellung
- Vorstellung des Hermle MPA Verfahrens
- Werkstoffe und Kennwerte
- Der Fertigungsablauf
- Repräsentative Bauteile



## Firmenvorstellung

**Hermle AG in Gosheim,  
Schwäbische Alb**



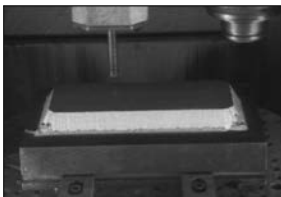
**Hermle Maschinenbau GmbH,  
Ottobrunn, München**



Entwicklung MPA-Technologie

## Kombiniertes Fertigungsverfahren

**Auftragen**



**&**

**Fräsen**



**MPA 40**





## Kombiniertes Fertigungsverfahren

Die Auftragseinheit befindet sich im Z-Schlitten und ist parallel zur Frässpindel orientiert.



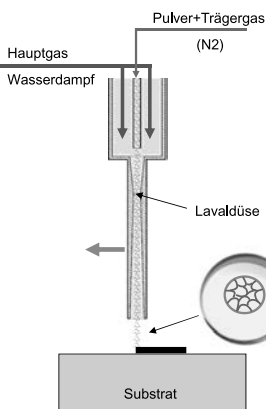
Tischdurchmesser: 420mm



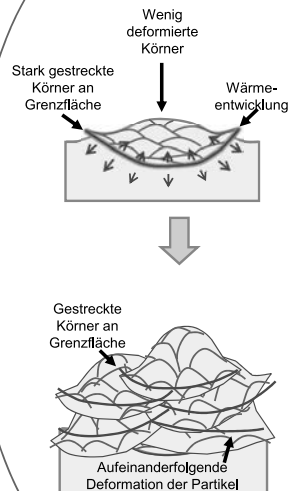
Auftragseinheit

Frässpindel

## MPA - Technologie



- Beschleunigung des Hauptgases (Wasserdampf) in der Lavaldüse
- Injektion der Pulverpartikel kurz vor Lavalpunkt
- Beschleunigung der Pulverpartikel auf Überschallgeschwindigkeit
- Pulverpartikel werden nicht aufgeschmolzen → geringer Energieeintrag in Bauteil



# Verfügbare Metallpulver

## Stähle / Eisen:

- 1.2344 Härtbarer Warmarbeitsstahl
- 1.2367 Härtbarer Warmarbeitsstahl
- 1.2333 Härtbarer Kaltarbeitsstahl
- 1.2379 Härtbarer Kaltarbeitsstahl
- 1.4404 Rostfreier Stahl
- 1.4313 Rostfreier Stahl
- Reineisen

## Schwermetalle:

- Reinkupfer
- Bronze

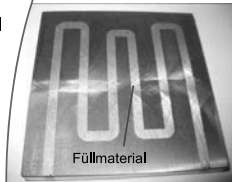
## Leichtmetalle:

- Titan

## Füllmaterial:

### Verwendung

Füllen von  
Kavitäten  
Stützstruktur  
Platzhalter



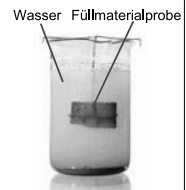
Bauteil mit Kühlkanal (Schnitt)

### Eigenschaften

Füllmaterial kann mit dem  
MPA-Verfahren aufgetragen  
werden

gut zerspanbarer Werkstoff

wasserlöslich



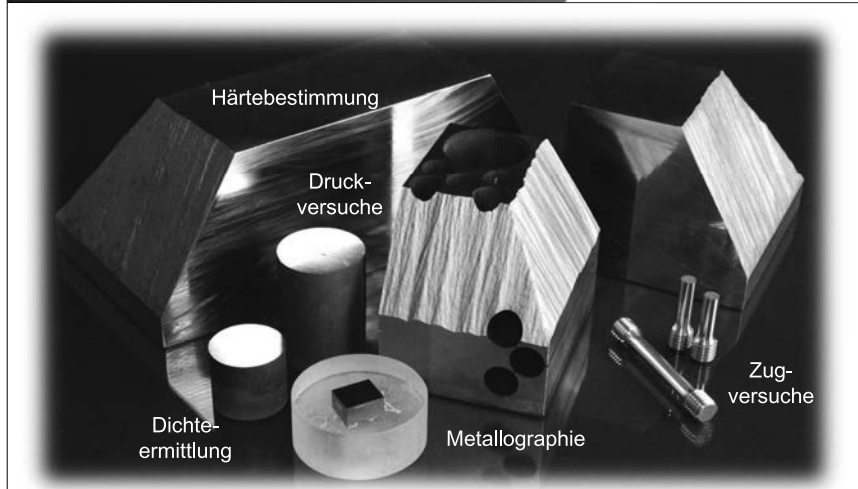
Trägermaterialprobe im  
Auflöseprozess

# CAM-Modul MPA Studio

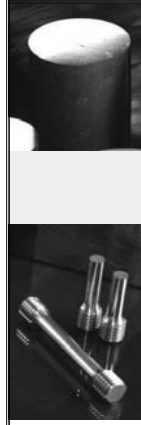


Hauseigene Cam-Software zur Planung,  
Simulation und Überwachung der  
Fertigungsprozesse

# Werkstoffuntersuchungen



## Kennwerte Werkzeugstahl 1.2344 (Standard)



\*) Die Ergebnisse gelten f. vergüteten Probenkörper mit einer Härte von 52HRC

### Porosität:

Standardfertigungsstrategie: <1%

Optimierte Fertigungsstrategie: 0%

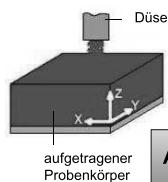
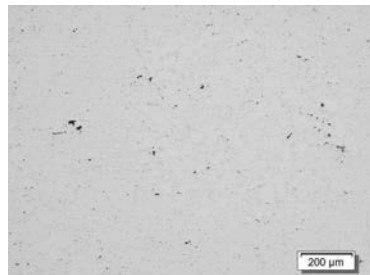
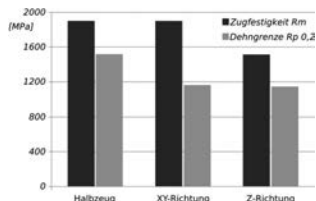
### Oberflächenhärte:

42-55 HRC einstellbar

### Druckfestigkeit\*:

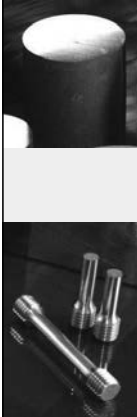
> 2000 Mpa

### Zugfestigkeit\*:



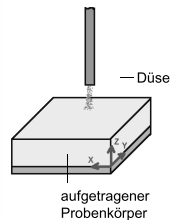
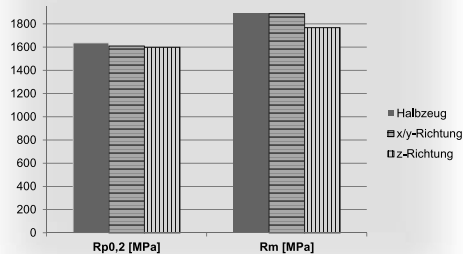
**Aufbaurrate Stahl**  
180 cm<sup>3</sup>/h

## Kennwerte Werkzeugstahl 1.2344 (Hochglanz)



Druckfestigkeit: > 2000 MPa

Zugfestigkeit und  $R_{p0,2}$ -Dehngrenze:



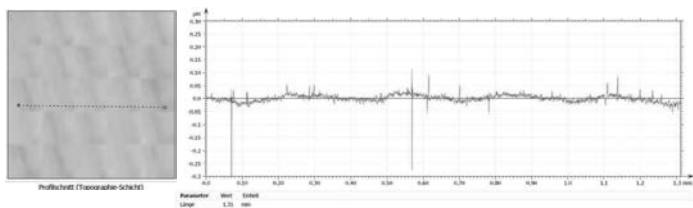
Elastizitätsmodul: 208 GPa

Bruchdehnung: 1 - 3 %

## Kennwerte Werkzeugstahl 1.2344 (Hochglanz)



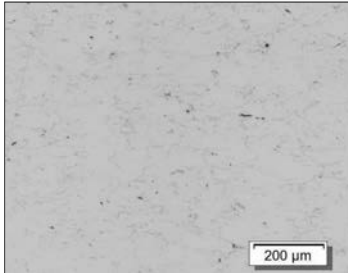
Rauheitsprofil nach ISO 4287 einer hochglanzpolierten Probe



Kennwerte	Messwerte	Einheit
Rz - Gemittelte Rautiefe	0.1	µm
Ra - Mittenrauwert	0.005	µm

## Kupfer und Kupfer-Stahlkombination

Gefüge im gespritzten Zustand



Kupfer im gespritzten Zustand:

- Porosität < 1 %
- Sauerstoffanteil 0,1 %

Kupfer nach Glühung:

- Härte 62 HBW<sub>2,5/62,5</sub>
- El. Leitfähigkeit  $53,8 \cdot 10^6$  S/m

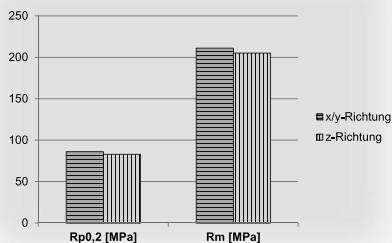
Aufbaurrate Kupfer  
900 cm<sup>3</sup>/h

## Kupfer und Kupfer-Stahlkombination

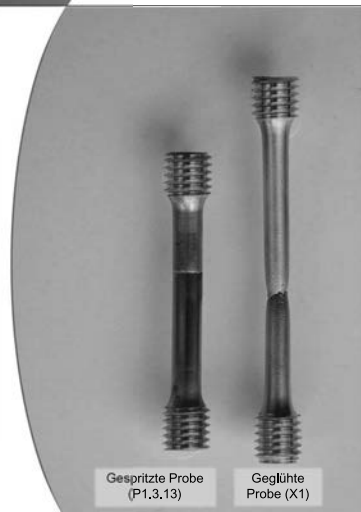
Dichte: 8,87 g/cm<sup>3</sup>

Oberflächenhärte: 59 HBW 2,5/62,5

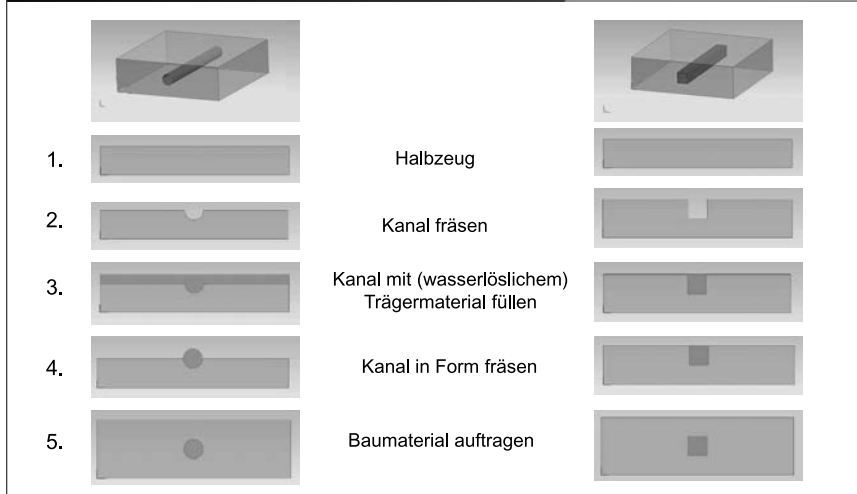
Zugfestigkeit und Rp0,2%-Dehngrenze:



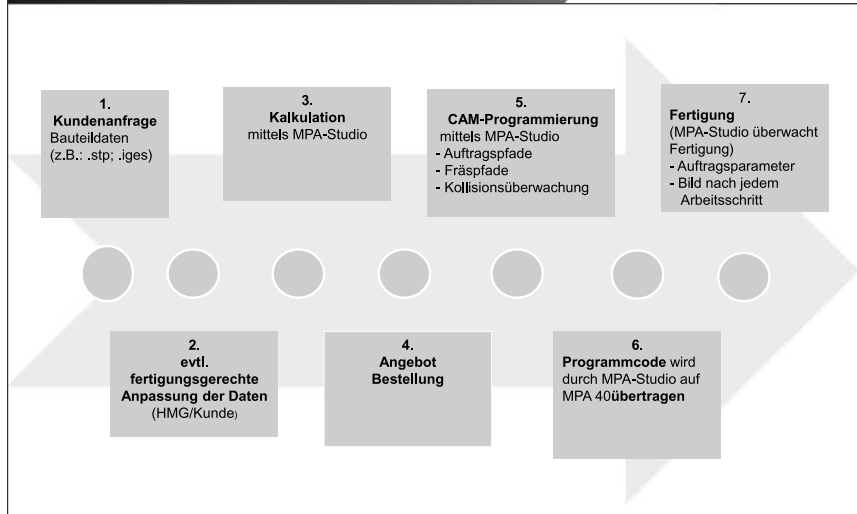
Bruchdehnung: ≥ 40



## Fertigungsablauf Kühlkanal



## Auftragsablauf



# Fertigungsablauf Rotationsbauteil

## 1. Schritt

Kühlkanal in Halbzeug fräsen.

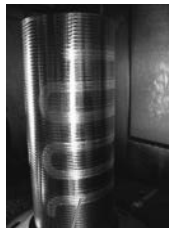


Halbzeug Kühlkanal

Das Halbzeug mit eingefrästem Kanal kann vom Kunden beigestellt werden

## 2. Schritt

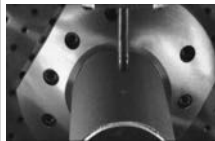
Kanal mit wasserlöslichem Trägermaterial befüllen



befüllter Kühlkanal

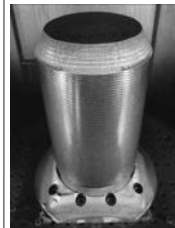
## 3. Schritt

Auftragen von Werkzeugstahl auf die Mantelfläche



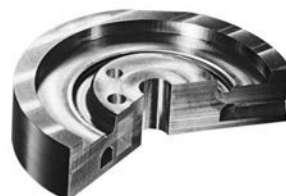
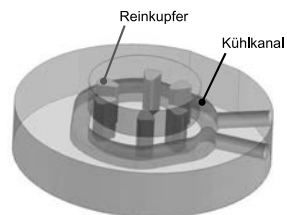
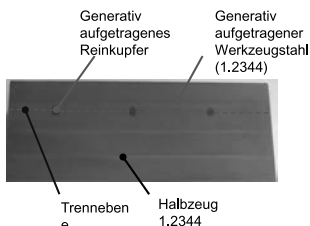
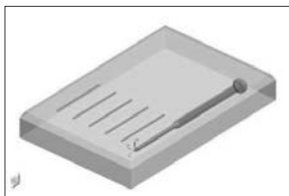
## 4. Schritt

Trägermaterial aus Kühlkanal lösen



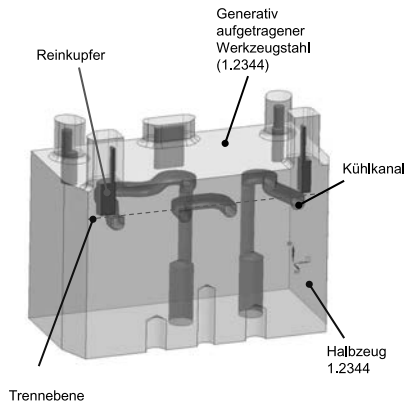
# Fertigungsablauf:

Gekühlte Werkzeugeinsätze  
(Stahl-Kupfer Kombination)



## Bauteilbeispiel:

Gekühlte Werkzeugeinsätze  
(Stahl-Kupfer Kombination)

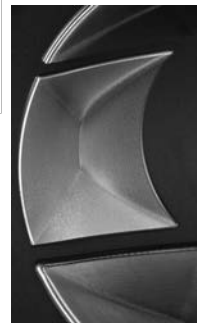


## Fertigungsablauf

Pulverauftrag auf große Volumen

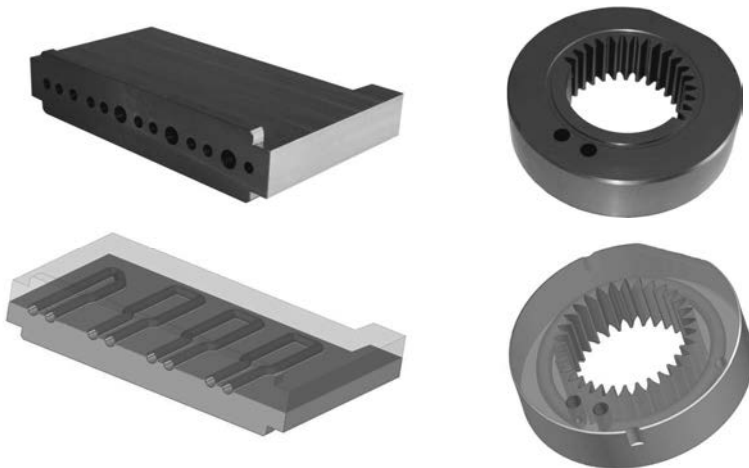


Dimensionen: 520mm x 520mm x 140 mm  
Kühlkanal: 18 mm x 18mm x 3400mm  
Gewicht: ca. 260 kg  
Materialien: 1.2344 Halbzeug  
1.2344 Pulver (ca. 40 kg)  
Reinkupfer





## Spritzgussformen



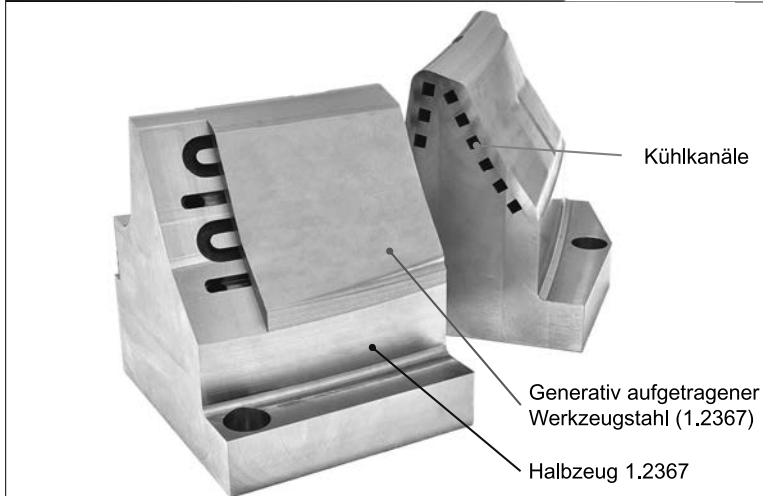
## Druckguss- und Spritzgussbauteile durch Rotationsauftrag



## Vorkammerbuchsen



## Gekühlter Werkzeugeinsatz



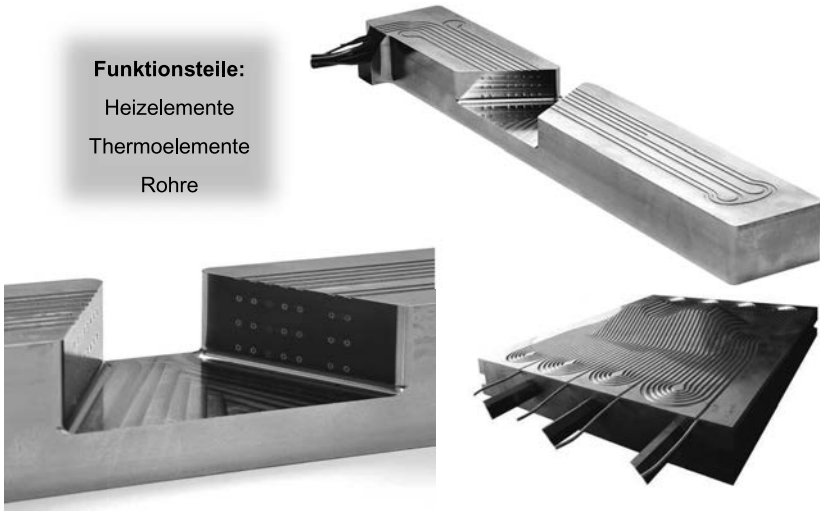
## Werkzeuge mit eingebetteten Funktionsteilen

### Funktionsteile:

Heizelemente

Thermoelemente

Rohre





# Schaumspritzgießen: Aktuelle Trends und neue Herausforderungen

**A. Handschke, KraussMaffei Technologies, München**

## Kurzfassung

Es ist eine lange bekannte Technologie, die perfekt den aktuellen Forderungen nach materialsparender, umweltfreundlicher und rationeller Fertigung entspricht. Schon seit den 70er Jahren bietet KraussMaffei Anlagen für das Thermoplastische Schaumspritzgießen (TSG) an und gibt hier einen Überblick über Möglichkeiten und Grenzen des Verfahrens.

## 1. Geschäumte Bauteile – Die Grundidee und die Vorzüge

Am Anfang war die Fehlerkorrektur: Schon in den 50er Jahren setzten findige Spritzgießer dem Material einen Hauch von Backpulver zu, wenn sich am Bauteil Einfallstellen zeigten. Diese Erfahrungen führten in den Folgejahrzehnten zur Idee des Thermoplastischen Schaumspritzgießens (TSG) – und brachten zwei verschiedene Verfahren hervor, je nachdem ob man das Treibmittel dem Material in Form von Mikrogranulat beimischt (= chemisches Schäumen) oder in der Schnecke direkt zudosiert (= physikalisches Schäumen).

Bei beiden gilt: Das Gas wird in der Schmelze in der Plastifizierung unter Druck gehalten und kann sich erst bei Druckabfall entfalten. Dann beginnt die Keimbildung und das Aufschäumen in der Kavität erfolgt. Das fertige Bauteil zeigt eine Integralschaumstruktur, das heißt, die Außenhaut ist kompakt und der Kern geschäumt, was gegenüber konventionell gefertigten Produkten eine Reihe von technischen und wirtschaftlichen Vorteilen mit sich bringt. So wird weniger Material benötigt, um die Kavität zu füllen und die Gewichtsersparnis kann je nach Bauteilgeometrie und -modifizierung 20% und mehr betragen. Diese Gewichtsreduktion geht einher mit einer erhöhten Maßhaltigkeit und hohen gewichtsspezifischen Steifigkeiten, wobei diese zusätzlich über die Dicke der Randschicht beeinflusst werden können.

Da sich das Material in der Kavität ausdehnt, entfällt die Notwendigkeit des Nachdrucks. Der Schäumdruck wirkt dabei auch angussfern und die ausgewogenere Druckverteilung und die gleichmäßige Schwindung in Längs- und Querrichtung führen zu weniger Spannungen und Verzug im fertigen Produkt.

Auch auf Seiten des Energieverbrauchs lässt sich mit TSG sparen, vor allem durch die kürzeren Zykluszeiten, die zum einen dadurch entstehen, dass gegenüber Vollkunststoffteilen etwa 15-30% schneller eingespritzt werden muss, um eine möglichst feine Verteilung der Zellen innerhalb der Schaumstruktur zu erreichen, und zum anderen durch die entfallende Nachdruckzeit. Zusätzlich benötigt man durch die verringerte Viskosität der Kunststoff-Gas-Schmelze und den Entfall des Nachdrucks niedrigere Schließkräfte an der Maschine. Die Prozesstemperaturen können insgesamt ebenfalls niedriger sein.

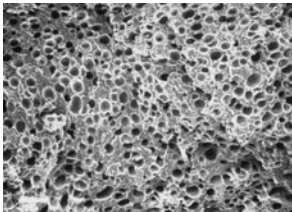


Bild 1: Innerer Ausschnitt eines geschäumten Thermoplasts

## **2. Bisherige Technologien - Treibmittelzusatz und Öffnungshub**

### **2.1 Chemisches Schäumen**

Chemische Treibmittel, die dem Basispolymer beigelegt sind, zersetzen sich, wenn bestimmte Prozesstemperaturen überschritten werden und spalten dann Treibgase ab, die sich in der Kunststoffschmelze lösen. Deshalb bestimmt die Temperaturführung den Erfolg des Verfahrens und stellt die einzige Möglichkeit dar, den Prozess zu beeinflussen. Ist die Temperatur zu hoch, erfolgt die Zersetzung zu früh und das Treibmittel entweicht durch den Trichter. Wird die Zersetzungstemperatur zu spät erreicht, kann sich das Gas nicht mehr im Basispolymer lösen. In beiden Fällen erfolgt nur wenig oder gar kein Aufschäumen. Ob die Temperatur stimmt, lässt sich im laufenden Prozess nur schwer feststellen, weil der Gasgehalt in der Schmelze nicht gemessen, sondern nur nachträglich über einen Gewichtsvergleich mit dem Kompaktbauteil ermittelt werden kann.

### **2.2 Physikalisches Schäumen**

Eine weitaus elegantere Lösung ist deshalb das physikalische Schäumen mit Hilfe von Stickstoff oder  $\text{CO}_2$ , und hier die bekannteste Variante MuCell der amerikanischen Firma Trexel Inc.. Als erster offizieller Partner bietet KraussMaffei seit 2001 unter dem Namen CellForm

Spritzgieß-Komplettsysteme mit MuCell-Technologie an. Das Gas wird zunächst in einen überkritischen Zustand gebracht, in dem es inkompressibel wie eine Flüssigkeit ist, aber die Diffusionseigenschaft von Gas aufweist, und dann in der Schnecke zudosiert. Durch die exakte Definition von Druck- und Flussrate sowie der Injektoröffnungszeit lässt sich die Gasmenge, die der Schmelze zuströmt, prozesssicher reproduzieren und auch Schuss für Schuss dokumentieren – was besonders für die Automobilindustrie wichtig ist.

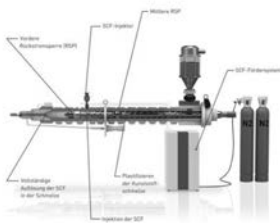


Bild 2: Wesentliche Ausstattung einer MuCell-Anlage



Bild 3: Türmodul in MuCell-Technik hergestellt



Bild 4: Mittelkonsole hergestellt in MuCell

## 2.3 Öffnungsprägen OCM (= Spritzgussintegralverfahren, SGI)

Bei der Füllung der Kavität stehen zwei Herangehensweisen zur Wahl: Im Niederdruckverfahren wird die Kavität nicht komplett volumetrisch gefüllt, den Rest der Füllung übernimmt dann das Gas anstelle der Nachdruckphase im klassischen Kompaktspritzguss. Der Schäumgrad wird über das Schussgewicht beziehungsweise die Teilfüllung während des Einspritzens bestimmt.

Beim Hochdruckverfahren wird die Kavität vollständig gefüllt, wodurch zunächst kein Platz für die Schaumbildung zur Verfügung steht und dadurch beim Füllen ein höherer Druck entsteht. Der Schäumprozess erfolgt erst beim Aufziehen des Werkzeuges. Das so genannte Öffnungsprägen (OCM) ermöglicht höhere Schäumgrade, wobei die Prozessführung etwas schwieriger ist, da der Zeitpunkt des Öffnungshubes zusätzlich ermittelt werden muss. So bildet sich die endgültige Wandstärke erst als Summe aus der ursprünglichen Wandstärke während des Einspritzens ins geschlossene Werkzeug plus den gewählten Hub beim Öffnen. Für Produkte, bei denen das Thema Biegesteifigkeit im Vordergrund steht, etwa bei Türmodulen, ist OCM besonders interessant. Je nach Material kann eine doppelte Randschichtdicke die Steifigkeit bei gleichem Schäumgrad verdreifachen. Die Schaumverteilung in einem OCM-Bauteil ist feiner und gleichmäßiger, weil beim Aufziehen über die gesamte Länge ähnliche Druckverhältnisse herrschen. Allerdings erfolgt die Schaumbildung immer nur in Hub-Richtung, quer dazu gar nicht und an Schrägen nur anteilig, was eine Einschränkung bei der Gestaltung der Bauteilteilgeometrie mit sich bringt.

## 3. Wirtschaftlichkeit – Was bringt die Schaumstruktur?

50% geringere Schließkraft, 10-20% geringere Zykluszeit, 10% weniger Material. Diese Zahlen gelten rechnerisch, allerdings nicht immer in der Praxis. Denn welche Maschine verwendet werden kann, bemisst sich nicht nur nach der Schließkraft, sondern auch nach der Größe der Aufspannplatten, und die Zykluszeitersparnis ist abhängig von der Wandstärke und vor allem von der Vermeidung von Materialanhäufungen (hot spots). Jedes Projekt kann daher erst nach der technischen Durchsprache kalkuliert werden. Generell sollte die Maschine eine hohe MuCell-Auslastung haben um einen kleinen Return on Invest zu ermöglichen. Auch die Gaskosten sind stark von der Abnahmemenge abhängig, generell aber niedriger als bei chemischen Treibmitteln.



## **4. Stellschrauben zur Optimierung**

### **4.1 Werkzeugauslegung**

Damit die Vorzüge des MuCell-Verfahrens voll zur Geltung kommen, braucht es speziell dafür ausgelegte Werkzeuge. So ist auf eine effektive Kühlung ohne hot spots zu achten, damit ein Nachblähen nach der Entformung (post blow) vermieden wird. Am Fließwegende und an den Bindenahtstellen bedarf es einer besonders guten Entlüftung. Grundsätzlich ist die Anbindung über einen Kaltkanal möglich, wobei dann bei Mehrfachanspritzung oder mehreren Kavitäten auf die Balancierung zu achten ist. Ein Heißkanalsystem muss mit Nadelverschlussdüsen ausgestattet sein, weil das Verteilersystem geschmolzen im Heißkanal verweilt und – wie die Schmelze in der Plastifizierung – unter Druck gehalten werden muss. Die Kaskadierung, also das zeitverzögerte Öffnen von Nadeln, zur Verminderung von Bindenähten ist möglich, aber verglichen mit dem Kompaktspritzguss nicht so oft nötig. Durch die bessere Fließfähigkeit des Materials können auch weniger Anspritzpunkte verwendet werden, wenn nicht gleichzeitig Wandstärken ausgedünnt werden.

### **4.2 Artikelauslegung**

Hier entscheiden sich Qualität und Wirtschaftlichkeit. Mit einem schaumgerecht designten Artikel sind die größten Einsparungen möglich, weil durch die niedrige Viskosität längere Fließwege und dünnere Wandstärken realisiert werden können. TSG bringt die Stabilität direkt an die gewünschten Stellen, so dass andere Bereiche, an denen die Stabilität nicht erforderlich ist, filigraner gestaltet sein können. Kühlzeiten für MuCell so weit wie möglich zu reduzieren bedeutet auch Materialanhäufung strikt zu vermeiden und die Wanddicken-Rippenverhältnisse von 3:1 auf 1:1 anzupassen. Auch wenn sich der Schäumgrad bei dünneren Wandstärken reduziert, ist die gesamte Materialersparnis durch die Volumenreduzierung enorm und kann bis zu 30% betragen.

Große Bauteile werden häufig in Verbindung mit OCM gefertigt, bei der Auslegung sind dann im Wesentlichen drei Kriterien zu berücksichtigen:

- Wie dünn kann ich das geschlossene Werkzeug noch füllen?
- Wie weit kann ich das Werkzeug aufziehen, um die notwendige Festigkeit zu erreichen?
- Welche Enddicken sind erlaubt, um das Bauteil noch verbauen zu können oder vom Designer freigeben?

### 4.3. Materialien

War früher die Bereitschaft, schäumgerechte Materialien zu kreieren nur bei einzelnen Herstellern vorhanden, so ist in letzter Zeit deutlich zu spüren, dass sich nun viele Anbieter mit dem Thema TSG beschäftigen. Dabei gibt es zwei Wege: Entweder Materialien extra dafür zu entwickeln oder bestehende Materialien zu testen. Ersteres ist aufwendiger, hat aber den Vorteil zielgerichtet auf Wünsche, etwa bezüglich der Oberflächenqualität, eingehen zu können. Bei bestehenden Materialtypen lassen sich Eigenschaften auch mit Hilfe von Additiven beeinflussen, beispielsweise solchen, die die Nukleierung fördern oder die Bildung von Schlieren an der Bauteiloberfläche reduzieren. Hier konnte man in den letzten zwei bis drei Jahren bemerkenswerte Resultate verzeichnen.

## 5. Bisherige Grenzen und neue Entwicklungen

KraussMaffei forscht in seinem Technikum mit Kunden konstant daran, die Möglichkeiten von TSG auszuweiten. Immer häufiger ist dabei nicht nur das Schäumen im Nicht-Sicht-Bereich mit moderater Gewichtseinsparung gefragt, sondern:

- Schäumgrade von mehr als 30% mit optimierten Artikeln oder OCM,
- Sichtbauteile mit optimierten / geeigneten Materialien ohne Zusatzverfahren,
- Hochglanz-Oberflächen mit Zusatzverfahren,
- Lackierfähige Oberflächen ohne und mit Zusatzverfahren.

### 5.1 OCM next Generation

Auch wenn das Öffnungsprägen (OCM) interessante Verbesserungen bei der Biegesteifigkeit bietet, so ist es werkzeugseitig doch sehr aufwändig. Um das Entweichen des Materials beim Aufziehen beziehungsweise die Abbildungenauigkeit im Randbereich des Bauteils zu vermeiden kommen hochpräzise Tauchkanten-Werkzeuge oder solche mit speziellen, in Hubrichtung beweglichen Dichtungsrahmen zum Einsatz. Auch ist das Werkzeug anfällig gegenüber Kippbewegungen während des Prägehubes, so dass die Spritzgießmaschine für optimale Ergebnisse eine Plattenparallelitätsregelung benötigt. Unter Umständen kann auf das Abdichten der Kanten verzichtet werden, wenn man schmelzstabile Materialien und eine optimale Prozessführung anwendet oder wenn der Artikel eine undefinierte Randbildung zulässt. Werkzeuge können auch dann einfacher ausgeführt sein, wenn man nur flächige Bereiche aufzieht und nicht das ganze Werkzeug. Diese Vorgehensweise eignet sich sowohl für

Artikel mit flachen Geometrien als auch bei 3D-Bereichen mit starken Zerklüftungen. Der flächige Bereich wird dann über einen Kern im Werkzeug gezogen.

## 5.2. Optische Hochglanzoberflächen

Bei gasbeladenen Schmelzen zeigt sich immer ein unschönes Phänomen: Während des Quellflusses gelangen stellenweise Gasbläschen an die Oberfläche, wo sie in die Länge gezogen werden und gleichzeitig einfrieren. Dadurch kommt es zu Schlieren, die im Extremfall sogar wie Kratzer spürbar sind. Ist die Werkzeugwand während des Einspritzvorgangs heiß, kann der Effekt rückgängig gemacht werden und es gelingt, Hochglanzoberflächen zu schaffen. Möglich ist dies mit Dynamic Mold Heating (DMH). Wie gut die Oberflächenqualität ausfällt, hängt vor allem vom Material und seiner Verarbeitungstemperatur ab. Bei PP mit niedriger Temperaturfestigkeit ergeben sich zwar Hochglanzoberflächen, aber auch muldenartige Strukturen. ASA oder ABS eignen sich besser, wobei den Prozessparametern sehr hohe Bedeutung zukommt. Bei optimalen Temperaturen und dem richtig gewählten Einspritzgeschwindigkeitsprofil lassen sich Bauteile mit hervorragender Oberfläche reproduzierbar herstellen. Die einfachsten Partner für MuCell und DMH sind PC-ABS und PC sowie andere Materialien mit hoher Temperaturbeständigkeit.

DMH ist als „Energievernichtung“ verpönt, wobei es darauf ankommt welches System man verwendet. Bei einer induktiven Werkzeugtemperierung wird zwar mit hohen Strömen gearbeitet, dies aber nur für kurze Zeit und bei Abschalten des Stroms wirkt schlagartig die Kühlleistung des Wassers – energetisch gesehen ein positiver Effekt. Reine Wassersysteme sind im Vergleich dazu wesentlich träger, dafür aber von der Anschaffung günstiger, leichter verfügbar und die Geräte geben sich mit wesentlich niedrigeren Stromanschlüssen zufrieden. Die etwas höheren Kosten für DMH lassen sich oft schnell durch die Vorteile am Bauteil erwirtschaften, wenn MuCell sowohl konstruktiv als auch prozesstechnisch optimal eingesetzt wird. Die Einschränkung bei der möglichen Bauteilgröße in Verbindung mit DMH, besonders wegen der Notwendigkeit von Einsätzen mit konturnaher Kühlung, kann ggf. umgangen werden, denn nicht immer liegt die komplette Oberfläche in Sichtfläche. Warum also den gesamten Einsatz mit DMH ausstatten?



Bild 5: MuCell-Bauteil (Blende) ohne DMH



Bild 6: MuCell-Bauteil (Blende) mit DMH erzeugter Hochglanzoberfläche

### 5.3. Sichtflächen ohne DMH

Wo es keine Hochglanz-Oberflächen braucht, lässt sich eine sehr gute Bauteiloptik auch mit einfacheren Maßnahmen als DMH realisieren, etwa indem man die vorhandenen Schlieren durch diffuse Reflexion unsichtbar macht. Dies gelingt mit Hilfe einer strukturierten Oberfläche (erodiert oder genarbt) in Verbindung mit einer geschickten Materialauswahl und der geeigneten Anspritzungsart. Auch über das Treibmittel mag man in diesem Zusammenhang nachdenken. Schon die Anwendung von  $\text{CO}_2$  statt  $\text{N}_2$  kann dazu beitragen, dass weniger Gasbläschen an die Oberfläche steigen. Noch geeigneter zur Eingrenzung von Schlierenbildung sind chemische Treibmittel. Die Energie, die in den Schaumbläschen steckt und sie an die Oberfläche befördert, ist bei diesen generell nur halb so groß und variiert innerhalb der verschiedenen Substanzen noch einmal.

Eine weitere Möglichkeit um die Oberflächengüte zu steigern, ist das Gasgegendruckverfahren (GGD), mit dem sich der Druckabfall in der Kavität vermeiden lässt, durch den die Bläschen an die Oberfläche steigen. Beim GGD wird vor dem Einspritzen mit Stickstoff in der Kavität ein Druck aufgebaut und während des Einspritzens geregelt reduziert. An der Schmelzefront bleibt so ein Druckniveau aufrecht erhalten, das verhindert, dass die Bläschen entweichen können. Da das Gas während der Druckphase nicht entweichen darf, müssen

die Kavitäten der Werkzeuge abgedichtet werden. Dies betrifft sowohl die äußere Umrandung wie auch Schieber und Auswerfer und bedeutet einen erheblichen Mehraufwand. Neue Ideen gehen nun in die Richtung, diesen Aufwand zu minimieren, um GGD wirtschaftlicher zu machen. Auch hier gilt die Frage: Liegt die gesamte Oberfläche im Sichtbereich?

#### **5.4 E&E-Anwendungen mit Flammschutzmittel**

Lange Fließwege mit vielen Umlenkungen und daraus resultierend hohe Drücke mit folgender Verzugsproblematik. Viele E&E-Anwendungen wie Steckerverbindungen, Schalter und Gehäuseteile sind ein ideales Einsatzgebiet für MuCell. Aber geht das auch mit Flammenschutzmitteln (FSM)? Fraglich war beispielsweise ob das FSM durch die höheren Scherbelastungen bei MuCell geschädigt wird, oder die Schaumstruktur an sich negative Auswirkungen auf die Brennbarkeit hat. Bei Untersuchungen (Brennbarkeit nach UL 94, Glühdrahttest, Kriechstromfestigkeit) ergaben sich zwar teilweise Abweichungen gegenüber der kompakten Ausführung, insgesamt aber keine negativen Auswirkungen. Umgekehrt beeinflussen FSM auch nicht die Festigkeit von TSG-Bauteilen.

#### **5.5. WPC und MuCell**

Sie sind sehr schwer: Artikel aus den beliebten Wood-Plastics-Composites (WPC), einem Gemisch aus Kunststoff, Holz und Additiven. Ein 30%iges Wood-PP-Compound hat eine Dichte von  $1,05 \text{ g / cm}^3$ , was bedeutet, dass man rechnerisch einen Schäumgrad von 15% erzielen muss, um die Dichte eines unverstärkten PP zu erreichen. KraussMaffei hat hierzu Versuche gefahren und das Ergebnis war erfreulich, denn WPC erwies sich als hervorragender Keimbildner und lieferte eine sehr feine und gleichmäßige Zellverteilung. Bei 10% Schäumgrad lagen die Volumenwerte zwischen 15 und 30% unter denen von kompakten WPC – ähnlich wie bei einem Vergleich mit reinen Kunststoffen.

#### **5.6 Ausgasung und Lackierfähigkeit**

Geschäumte Bauteile gasen nachträglich aus, weil ein Druckausgleich zwischen dem Gasdruck in den eingeschlossenen Zellen und dem Atmosphärendruck stattfindet. Dieser Prozess kann zwischen zwei und sieben Tagen dauern und muss daher bei der Bearbeitung der Oberfläche durch Kaschieren, Folienhinterspritzen, Lackieren, Verchromen und ähnliches berücksichtigt werden. Folien und Textilien müssen durchlässig sein, um das Gas nachträg-

lich entweichen lassen zu können, ansonsten blähen sie sich nachträglich auf. Beim Lackieren oder Verchromen ist gleiches zu erwarten, da es hier keine permeablen Deckschichten gibt. Stand heute ist, dass der Ausgasungsprozess vor der Weiterbehandlung abgeschlossen sein muss. Im Rahmen einer Masterthesis wurde bei KraussMaffei die Ausgasung in Abhängigkeit verschiedener Materialien und Prozesseinstellungen untersucht, ebenso die mechanischen Eigenschaften sowie die Schaumstruktur und der Einfluss einer dynamischen Beheizung mit DMH. Erwartungsgemäß wirkten sich Schäumgrad und Gasgehalt signifikant auf den Permeationsprozess und damit auch auf die Intensität und die Dauer der Ausgasung aus. Die Einstellparameter wie Einspritzgeschwindigkeit und Werkzeugtemperatur bewirkten zwar eine Änderung im Ausgasungsprozess, erstaunlicherweise aber nicht immer in die gleiche Richtung. Hier zeigten sich extreme Schwankungen.

Der Ausgasungsprozess ist das Maß aller Dinge, wenn es um die Lackierbarkeit geht und es muss das Ziel sein, schon während des Spritzgießens eine möglichst geringe Ausgasung zu „verursachen“. Man wird es aber nicht vermeiden können, zusätzliche Maßnahmen zu ergreifen, um diese Bauteile lackieren zu können. Im einfachsten Fall wäre das eine Lagerung, die zumindest minimiert werden kann, wenn man auf bestimmte Prozesseinstellungen achtet. Für Online-Prozesse gibt es erste Lösungsansätze, und man darf gespannt sein, welcher davon sich auf dem Markt durchsetzt.

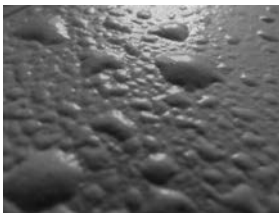


Bild 7: Unmittelbar nach dem TSG lackiertes Bauteil mit sehr hoher Ausgasung

## 5.7 Schweißbarkeit

Viele Bauteile im Nicht-Sichtbereich werden geschweißt, und es liegt nahe, dass dies auch für MuCell-Teile gewünscht wird. In der Praxis geschieht das selbstverständlich, allerdings nicht immer problemlos. Beim Schweißen mit von außen eingebrachter Wärme, etwa durch Heizelemente oder Heizgas, ist es wichtig auf die Temperaturhöhe und die Dauer der Energieeinbringung zu achten und auch die Gegebenheiten am Bauteil (Randstärke, Schaumstruktur, Spritzparameter) entscheiden über den Erfolg.

Um seinen Kunden mehr Sicherheit bei der Thematik „Schweißen von geschäumten Bauteilen“ geben zu können, wurden bereits Untersuchungen angestellt, weitere werden folgen.



Bild 8 und Bild 9: Mit MuCell hergestellter Ventildeckel – die beiden Bauteile werden miteinander verschweißt

## 5.8 APC – Adaptive Prozessregelung

Im Bereich Kompakt-Spritzguss wurde sehr erfolgreich die Maschinenfunktion Adaptive Process Control (APC) in den Markt eingeführt. Hierbei handelt es sich um eine vollautomatische Anpassung von Umschaltzeitpunkt und Nachdruckhöhe von Schuss zu Schuss. Diese Regelung gleicht Viskositätsschwankungen aus und bewirkt wesentlich stabilere Schussgewichte. Der Anfahrprozess besonders bei Unterbrechungen verkürzt sich dramatisch. Mit kleinen Anpassungen ist APC auch für das Schaumspritzgießen geeignet, wobei das Anfahren ohne Gas ohne APC erfolgen muss, da es andernfalls zu Regelungsschwankungen kommen würde, wenn das Gas zugeschaltet wird. Doch auch bei ausgeschaltetem APC kann man sich den angezeigten Viskositätsindex für die Qualitätsüberwachung zu Nutze machen. Er dient als Indikator, um zu erkennen ob Gas in der Schmelze ist. Und natürlich hilft APC auch im Schäumprozess, nach Unterbrechungen schneller wieder Gutteile zu bekommen. Die Entwicklungen hierfür sind noch nicht ganz abgeschlossen.





# Präzise optische Komponenten durch innovative Werkzeugkonzepte

Prof. Dr.-Ing. **C. Hopmann**, Dipl.-Ing. **M. Theunissen**,  
**M. Röbig** M. Sc., Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV)  
an der RWTH Aachen

## 1. Einleitung

Die Herstellung komplexer, optischer Systeme wird als Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts bezeichnet, welche Potenziale in nahezu allen Zukunftsbranchen für neue Anwendungen birgt. Bis zum Jahr 2020 erwarten Experten einen Anstieg des Weltmarktvolumens von 350 Milliarden Euro (Stand Jahr 2011) auf 615 Milliarden Euro [BHH+14]. Im Jahr 2011 wurden davon 27 Milliarden Euro in Deutschland erwirtschaftet [BHH+14]. Optische Systeme aus transparenten Kunststoffen stehen im wirtschaftlichen und technologischen Wettbewerb zu Glasoptiken. Große Freiheiten hinsichtlich der Gestaltung der optischen Funktionsoberflächen, die Integration mehrerer Funktionsteile, die gute Urformbarkeit, geringe Materialkosten und ein geringes spezifisches Gewicht (geringe Dichte) begründen das Substitutionspotenzial [Bec14, DRW12, MLN+07]. Diese Vorteile ermöglichen es, optischen Kunststoffen, den Werkstoff Glas im Bereich optischer Anwendungen zunehmend zu ersetzen. Vielfältige Anwendungen für optische Komponenten aus Kunststoff, wie beispielsweise Handkameras oder Displays, ermöglichen innovative Produkte in Bereichen wie der Automobiltechnik oder bei Lifestyle-Produkten. Die Herstellung im Spritzgieß- und Spritzprägeverfahren erlaubt dabei die Fertigung in hoher Qualität und zu einem vergleichsweise günstigen Preis in nur einem Verarbeitungsschritt [MF06, MS05, ZPD08].

Optische Anwendungen können gemäß ihrer Stückzahl und Qualitätsanforderungen in Qualitätsklassen eingeteilt werden (Bild 1). Das größte Substitutionspotenzial durch Kunststoffe ergibt sich im Bereich geringer und mittlerer Qualitätsanforderungen bei mittleren und hohen Stückzahlen (grau hinterlegt). Am Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV) an der RWTH Aachen wurden vor diesem Hintergrund sowohl grundlegende als auch anwendungsorientierte Forschungsarbeiten zur Replikation komplexer Optikkomponenten durchgeführt, um das Substitutionspotenzial auszunutzen und hinsichtlich der Replikation hochwertiger optischer Komponenten zu erweitern.

Einen großen Einfluss auf die optische Leistungsfähigkeit hat die Geometrie der lichtbrechenden, optischen Funktionsoberflächen. Diese komplexe, teils dickwandige Geometrie von

Kunststoffoptiken stellt allerdings auch die Herausforderung für den Herstellungsprozess eben dieser Kunststoffoptiken dar, da sie jeglichen Gestaltungsrichtlinien für die Herstellung von Kunststoffformteilen im Spritzgießverfahren widerspricht. Die optischen Technologien erfordern neue Verfahren und wirken zunehmend auf Neuentwicklungen in Industrie und Wissenschaft ein [BHH+14, DDK+12, NN12]. Daraus ergeben sich unter anderen hohe Anforderungen an die Werkzeugtechnik, um eine hohe optische Qualität sicherzustellen. Im Folgenden werden exemplarisch zwei Werkzeugkonzepte vorgestellt, welche am IKV entwickelt wurden, um die steigenden Anforderungen erfüllen zu können.

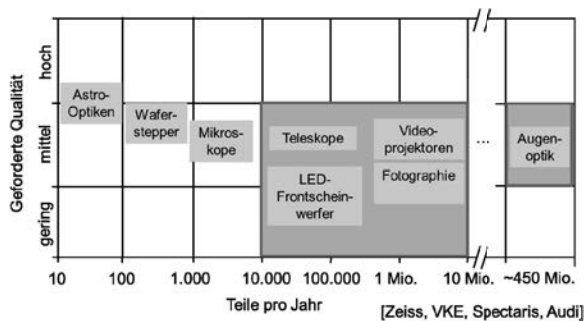


Bild 1: Relation von Stückzahl und Qualität bei Kunststoffoptiken

## 2. Werkzeug- und prozesstechnische Anforderungen an Kunststoffoptiken

### 2.1 Multilayer-Verfahren – Werkzeugtechnik zur Herstellung dickwandiger, individualisierter Optiken

Bei der Replikation von Kunststoffoptiken steht neben einer hohen optischen Leistungsfähigkeit eine wirtschaftliche Herstellung im Vordergrund. Oft werden die amorphen Thermoplaste Polymethylmethacrylat (PMMA) oder Polycarbonat (PC) für optische Komponenten eingesetzt, welche aufgrund der geforderten Lichtverteilung oftmals dickwandig (oberhalb von 10 mm) ausgeführt werden müssen [Map14]. Dies steht einer wirtschaftlichen Herstellung im Spritzgieß- oder Spritzprägeverfahren entgegen, da dickwandige qualitativ hochwertige Optiken nur mit langen Kühlzeiten hergestellt werden können [Bec14, DDK+12, Zöl12].

Das sogenannte Multilayer-Spritzgießen, auch Mehrschichttechnik oder Overmoulding genannt, bietet durch einen schichtweisen Aufbau dickwandiger Kunststoffoptiken die Möglichkeit, die Kühlzeit deutlich zu reduzieren. Dabei haben sich unterschiedliche Verfahrensstrategien etabliert (Bild 2) [Hop14]. Die einfachste Möglichkeit zur Herstellung mehrschichtiger Optiken bietet ein zweischichtiger Aufbau. Dazu wird ein Vorspritzling einseitig überspritzt.

Ein deutlich größeres Potenzial zur Zykluszeitreduzierung bieten jedoch dreischichtig aufgebaute Linsen. Hier besteht die Möglichkeit, die Schichten sequenziell zu fertigen oder einen Vorspritzling simultan beidseitig zu überspritzen. Dreischichtige Linsen bieten neben dem größeren Potenzial zur Kühlzeitreduzierung den Vorteil, dass der Vorspritzling vollständig von dem Nachspritzling umschlossen wird. So wird die Qualität der optischen Oberfläche nur durch die äußeren Schichten bestimmt.

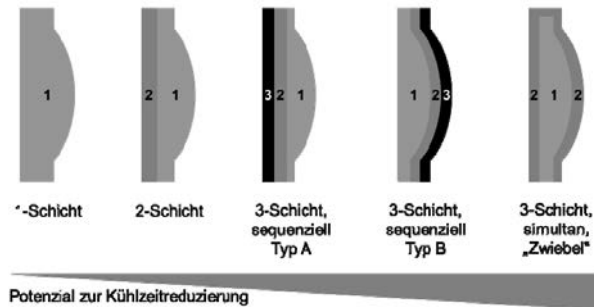


Bild 2: Strategien für Mehrschicht-Optiken [Hop14]

Am IKV wurde das Multilayer-Spritzgießen von zwei- und dreischichtigen Linsen im Rahmen des abgeschlossenen IGF-Forschungsprojekts 16862 N hinsichtlich einer wirtschaftlichen Fertigung und der optischen Leistungsfähigkeit untersucht. Dazu wurde in Zusammenarbeit mit der Fa. Hermann Rausch Werkzeug- und Formenbau GmbH, Hösbach, eine innovative Werkzeugtechnologie entwickelt und umgesetzt. Diese basiert auf dem Prinzip der Core-Back-Technik, welche auch aus dem Mehrkomponentenspritzgießen bekannt ist. Durch das Zurückziehen von Werkzeugkernen wird zusätzliches Kavitätsumfolumen freigegeben. So können ein- und zweischichtige Linsen sowie sequenziell oder simultan aufgebaute dreischichtige Linsen hergestellt werden. Integrierte schiefe Ebenen auf der Schließ- und Düsenseite ermöglichen eine stufenlose Verstellung der Werkzeugkerne mithilfe von Hydraulikzylindern, sodass eine Schichtdicke zwischen 5 und 30 mm realisiert werden kann. Ein Vorteil der Core-Back-Technik im Vergleich zur Drehteller- und Umsetztechnik liegt darin, dass das Werkzeug während des kompletten Spritzgießzyklus geschlossen bleiben kann und so der Einschluss von Fremdpartikeln minimiert wird. Nachteilig ist die eingeschränkte Designfreiheit, die aus den beweglichen Kernen resultiert.

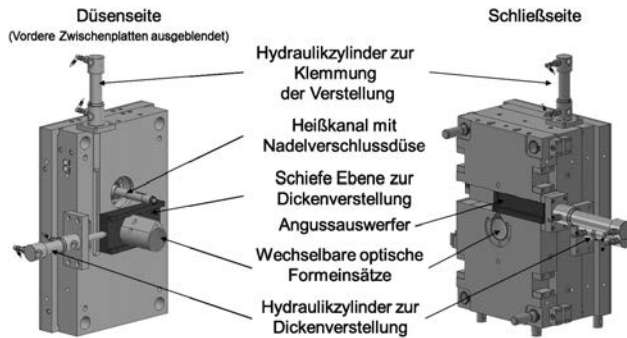


Bild 3: Werkzeugtechnik mit Core-Back-Technologie für das Multilayer-Spritzgießen

Da zur Herstellung aller Schichten das gleiche Plastifizieraggregat genutzt wird, besteht eine große Herausforderung darin, alle Schichten mit demselben Angussssystem anzubinden. Das Werkzeug ist mit einem auf optische Anwendungen angepassten Heißkanalsystem mit Nadelverschlussdüse der Firma Otto Männer GmbH, Bahlingen, ausgerüstet. Über einen kurzen Angussverteiler ist der Heißkanal mit der Kavität verbunden. Dieser Angussverteiler kann über einen hydraulischen Schieber bei geschlossenem Werkzeug von der Linse abgetrennt und ausgeworfen werden (Bild 4). Auf diese Weise ist es möglich, denselben Angussverteiler sowohl für den Vorspritzzling als auch für die nachfolgenden Schichten zu nutzen.

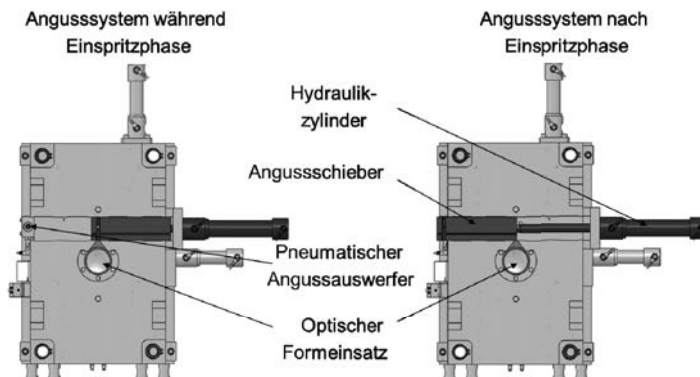


Bild 4: Angussystem für das Multilayer-Spritzgießen

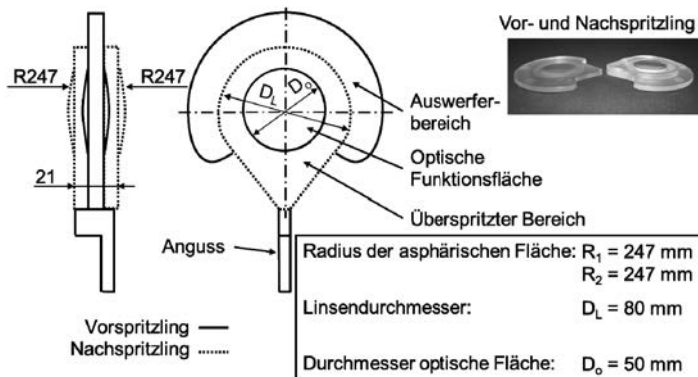


Bild 5: Probekörpergeometrie für das Multilayer-Spritzgießen

Die untersuchte Probekörpergeometrie entspricht Linsen mit einem Außendurchmesser von 80 mm und einer Dicke von 7 mm für jede Schicht (Bild 5). Durch wechselbare optische Formeinsätze können unterschiedliche Linsengeometrien (plan/plan; plan/konvex; plan/konkav; bikonvex etc.) realisiert werden. Der im Bild gekennzeichnete Auswerferbereich dient zum einen zum späteren Auswerfen der Linse. Zum anderen wird der Vorspritzling durch diesen Bauteilbereich in Position gehalten, wenn die Werkzeugkerne in die hintere Position verfahren werden und für das Überspritzen ein Schmelzedruck appliziert wird.

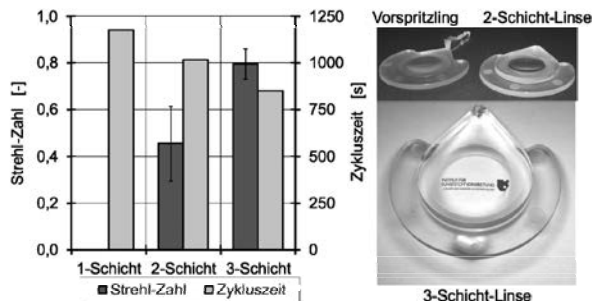


Bild 6: Optische Eigenschaften und Zykluszeiten beim Multilayer-Spritzgießen

Um das Multilayer-Spritzgießen hinsichtlich seiner Wirtschaftlichkeit und der Qualität der hergestellten Linsen einzuordnen wurden umfangreiche Prozessuntersuchungen am IKV

durchgeführt. Die optische Leistungsfähigkeit der hergestellten Linsen kann beispielsweise anhand der Strehl-Zahl, einer charakteristischen geometriespezifischen Größe für die Abbildungsleistung einer Linse, beurteilt werden. Sie beschreibt das Verhältnis der maximalen Intensität auf der Bildebene zur Intensität einer idealen beugungsbegrenzten Abbildung bei gleicher Apertur. Die Strehl-Zahl kann nur Werte zwischen Null und Eins annehmen, wobei das theoretische Optimum von Eins aufgrund von Reflexionen an der Probenoberfläche in der Praxis nicht erreicht wird. Die optische Qualität ein- und mehrschichtig aufgebauter Linsen wurde vergleichend anhand einer 21 mm dicken Linse untersucht (*Bild 6*). Während bei einschichtigen Linsen die optische Qualität aufgrund von Schwindung derart schlecht ist, dass keine Auswertung der optischen Qualität stattfinden kann, steigt die optische Qualität beim zweischichtig und dreischichtig aufgebauten Bauteil (14 mm + 7 mm und 3 x 7 mm) deutlich an. Ferner konnte die Abformgenauigkeit gesteigert werden. Die dreischichtigen Linsen konnten dabei mit einer ca. 30 % kürzeren Zykluszeit hergestellt werden als die einschichtigen Linsen [Hop14].

Im Rahmen des aktuell laufenden IGF-Forschungsvorhabens 18825 N wird das Spritzprägen für das Multilayer-Verfahren adaptiert. Das Spritzprägen als Kombination aus Spritzgieß- und Pressverfahren verknüpft die prozessspezifischen Vorteile beider Verfahren. Aus dem Spritzgießen stammen die Automatisierbarkeit und die vielfältigen Eingriffsmöglichkeiten, vom Pressverfahren die gleichmäßige Materialverdichtung und die homogene Druckverteilung. Eigenschaften, die für die Herstellung optischer Komponenten besonders wichtig sind. Durch eine optimierte Schichtdickenverteilung sowie durch eine dynamische Werkzeugtemperierung soll darüber hinaus die Zykluszeit weiter reduziert werden. Weil die mittlere Schicht keine optisch aktive Oberfläche darstellt, kann sie mit deutlich verkürzter Kühlzeit hergestellt werden. Dies erlaubt, den Vorspritzling in einer Kavität mit geringerer Werkzeugwandtemperatur und der damit einhergehenden geringeren Abformgenauigkeit herzustellen, um die Zykluszeit weiter zu reduzieren. In *Bild 7* ist das Abkühlverhalten einer einschichtig und dreischichtig aufgebauten Linse (Gesamtdicke 30 mm) aus Polymethylmethacrylat (PMMA) dargestellt. Durch einen mehrschichtigen Prozess mit konstanter Schichtdicke und Werkzeugtemperatur können demnach ca. 30 % Zykluszeit eingespart werden. Wird die Schichtdicke des Vorspritzlings auf 18 mm erhöht und gleichzeitig die Werkzeugtemperatur reduziert, ist eine Zykluszeitreduktion von ca. 60 % im Vergleich zur einschichtigen Linse möglich.

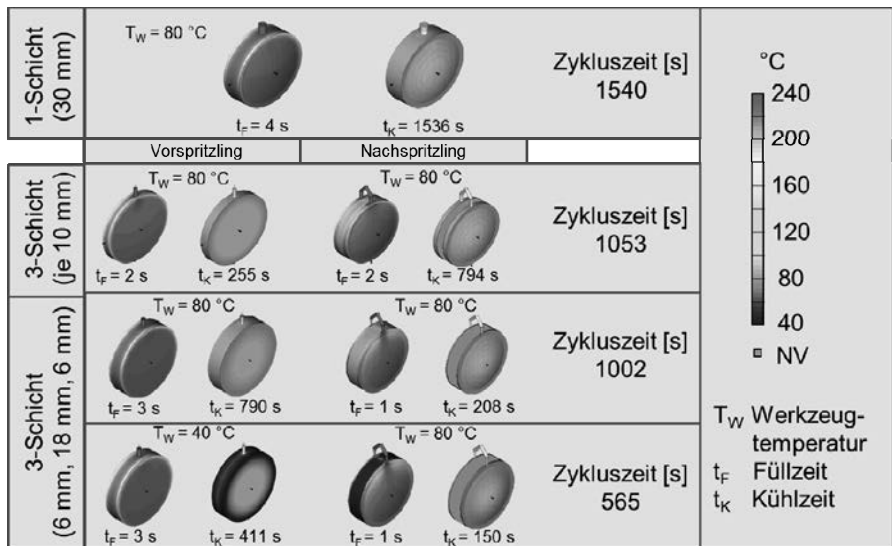


Bild 7: Simulative Berechnung der benötigten Zykluszeit von einschichtigen und dreischichtigen Linsen

## 2.2 Minimierung des Zentrierfehlers durch eine aktive Justage im Werkzeug

Die optische Leistungsfähigkeit spritzgegossener oder -geprägter Kunststoffoptiken hängt neben der präzisen Replikation der optischen Flächen entscheidend von deren Zentrierung zueinander ab. Eine laterale Verschiebung der beiden Werkzeughälften zueinander kann den sogenannten Zentrierfehler der Linse zur Folge haben. Der Zentrierfehler nach DIN ISO 10110-6 beschreibt dabei die Abweichungen der optischen Achsen beider Linsenoberflächen zueinander. Bildunschärfe oder Verzeichnung sind Abbildungsfehler, die durch zentrierfehlerbehaftete Linsen hervorgerufen werden können. Um den Zentrierfehler bei der Abformung von Kunststoffoptiken zu minimieren und die optische Leistungsfähigkeit der hergestellten Kunststoffoptiken weiter zu steigern, wurde am IKV im Rahmen des Sonderforschungsbereichs SFB/TR4 ein neuartiges Werkzeugkonzept mit integrierter Justageeinheit entwickelt und zusammen mit der Fa. Krallmann Holding u. Verwaltungs GmbH, Hiddenhausen, umgesetzt.

Das Herzstück des Prägewerkzeugs ist die Justageeinheit mit integrierten Piezo-Aktuatoren. Mit dieser Einheit kann im Stammwerkzeug (Bild 8), das sowohl für das Spritzgießen als auch für das Spritzprägen ausgelegt ist, der düsenseitige Formeinsatz in x- und y-Richtung

verschoben werden. Um eine möglichst genaue Ausrichtung der Werkzeughälften zu erlangen, Ein besonderes Augenmerk wurde bei der Umsetzung des Werkzeugkonzepts auf die Führung der beiden Werkzeughälften zueinander gelegt. Zusätzlich zu den konventionellen Säulenführungen wurden Flachführungen in das Werkzeug integriert. Diese ermöglichen eine präzise Führung/Zentrierung und können eine unterschiedliche Wärmedehnung der beiden Werkzeughälften kompensieren.

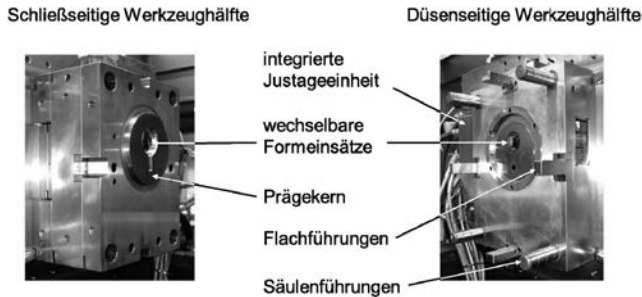


Bild 8: Werkzeugkonzept mit integrierter Justageeinheit

Die düsenseitige Justageeinheit besteht aus einem x-y-Schlitten, welcher mit dem wechselbaren optischen Formeinsatz fest verbunden ist (Bild 9). Dieser x-y-Schlitten wird je Längenänderung des Piezo-Aktuators in die jeweilige Position bewegt. Da Piezo-Stapelaktoren eine Druckkraft, aber keine Zugkraft aufbringen können, wurde in der horizontalen Achse dem Aktuator gegenüberliegend eine entsprechende Druckfeder eingesetzt. In der vertikalen Achse reichte das Gewicht der x-y-Justageeinheit (32,55 kg) für eine Rückstellung des Piezo-Aktuators. Die entscheidenden Vorteile neben einer schnellen, genauen und temperaturunabhängigen Verstellung sind integrierte Dehnungsmessstreifen, die eine Aussage über die aktuelle Position des Aktuators und folglich schon während des Prozesses einen groben Schluss auf den Zentrierfehler zulassen. Während des Prozesses wird der Schlitten nach dem Schließen des Werkzeugs vom Gegendruck der schließseitigen Werkzeughälfte in Position gehalten. Die Abformung der Kunststofflinse erfolgt z. B. über einen konventionellen Spritzprägeprozess. Die Prägekerne haben einen Durchmesser von 60 mm, welche wechselbare Formeinsätze mit einem Durchmesser der optischen Funktionsfläche von 50 mm aufnehmen können. Der Außendurchmesser der Linsen beträgt 70 mm. Da der Justagemechanismus in der Düsenseite integriert ist, wurde der Prägemechanismus mit federnd gela-



gertem Dichtring in der Schließseite platziert, um die Komplexität des Werkzeugs zu reduzieren und somit einen steiferen Aufbau zu ermöglichen.

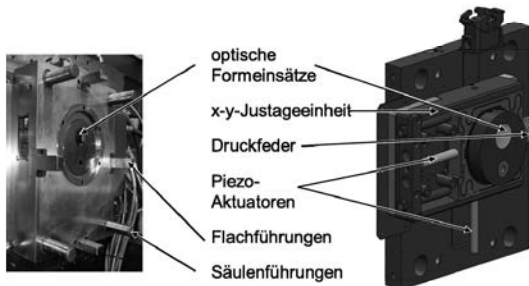


Bild 9: Justageeinheit in düsenseitiger Werkzeughälfte

Die neu entwickelte Justageeinheit erlaubt eine unmittelbare Korrektur der Position der optischen Formeinsätze zueinander in lateraler Ebene in einem Bereich von 100  $\mu\text{m}$  und einer Auflösung im einstelligen Mikrometer-Bereich. Grundlegende Untersuchungen an einer bikonvexen dickwandigen Linse im Spritzprägeverfahren haben gezeigt, dass eine Beeinflussung des Zentrierfehlers möglich ist. Die untersuchten Linsen wurden im kraftgeregelten Spritzprägeverfahren hergestellt. Das verwendete Material war ein Plexiglas 7N der Firma Evonik Industries AG, Essen. Zunächst wurden Linsen mit minimalem Zentrierfehler (Koordinatenursprung) hergestellt. Anschließend wurden die Piezo-Aktuatoren in acht Versuchspunkten um jeweils 20  $\mu\text{m}$  verstellt. Dieses Vorgehen zeigt, dass der Zentrierfehler mit dem vorliegenden Werkzeugkonzept in den einstelligen Mikrometer-Bereich reduziert werden kann (Bild 10) [Wal14].

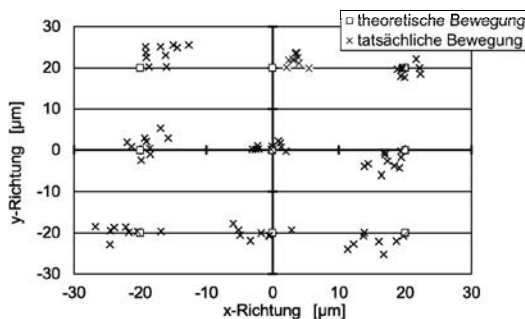


Bild 10: Ergebnisse der Einsatzausrichtung mithilfe der Piezo-Aktuatoren

### 3. Fazit und Ausblick

Zur wirtschaftlichen Herstellung qualitativ hochwertiger Optiken im Spritzgieß- und Spritzprä-  
geverfahren liegt ein besonderer Fokus auf der Werkzeugtechnik. Am IKV werden hierzu in  
Forschungs- und Entwicklungsprojekten Werkzeugkonzepte für Kunststoffoptiken entwickelt,  
unter anderem für die mehrschichtige Herstellung dickwandiger Optiken und für eine aktive  
Justage der Optiken während der Produktion.

Das Multilayer-Spritzgießen von dickwandigen optischen Komponenten ermöglicht es, die  
sonst üblichen hohen Zykluszeiten um bis zu 30 % zu senken. Die Abformgenauigkeit der  
hergestellten Bauteile steigt durch das geringere Schwindungspotenzial und die Behebung  
von Oberflächendefekten durch die äußersten Bauteilschichten. Um diese höhere Produkti-  
onseffizienz zu erreichen und das Multilayer-Spritzgießen erfolgreich umzusetzen, ist die  
Werkzeugtechnik von entscheidender Bedeutung. Ein neu entwickeltes Spritzgießwerkzeug  
am IKV ermöglicht es, Ein-, Zwei- und Dreischicht-Linsen mit Dicken bis zu 30 mm herzustel-  
len.

Die Minimierung des Zentrierfehlers, der beim Kunststoffformgebungsprozess durch eine  
laterale Verschiebung der beiden Werkzeughälften zueinander auftreten kann, stellt hierbei  
eine neue Herausforderung dar. Der Einsatz von Piezo-Aktuatoren zur Realisierung lateraler  
Bewegungen des Formeinsatzes konnte erfolgreich umgesetzt werden. Durch eine integrier-  
te Justagemöglichkeit kann der Zentrierfehler an Kunststofflinsen deutlich reduziert werden.  
Eine Ausrichtung beider optischer Funktionsflächen zueinander führt zu Linsen mit einem  
mittleren Zentrierfehler im einstelligen Mikrometer-Bereich, was einer Verbesserung um den  
Faktor 5 zu dem bisher eingesetzten Werkzeug entspricht.

### 4. Dank

Die vorgestellten Arbeiten wurden von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) im  
Rahmen des transregionalen Sonderforschungsbereichs SFB/TR4 und über die AiF im  
Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und  
-entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Be-  
schlusses des Deutschen Bundestages finanziell gefördert. Allen Institutionen gilt unser  
Dank.

## 5. Literatur

- [Bec15] BECKER, U.: In acht Takten zur fertigen Linse. *Kunststoffe* (2014) 126-128
- [BHH+14] BÄHREN, M.; HARTMANN, H.; HEIN, G.; LÖFFLER, A.; MANOK, K.; J., P.; TREPTOW, S.; TOBER, U.: Photonik - Branchenreport 2014. In: SPECTARIS, V., ZVEI, BMBF (Hrsg.): *Photonik - Branchenreport 2014*. Berlin, Düsseldorf, Frankfurt am Main, Hamburg: 2014
- [DDK+12] DÖBLER, M.; DORIN, F.; KLINKENBERG, C.; WOJCIECH, C.; REINARTZ, K.; ESCH, J. M.: LED-Lichttechnik im Trend. *Kunststoffe* 102 (2012) 10, S. 26-31
- [DRW12] DRUMMER, D.; RANFT, F.; WILDNER, W.: Kunststoffe in optischen Systemen. *Kunststoffe* 102 (2012) 10, S. 20-24
- [Hop14] HOPMANN, C.: *Herstellung von dickwandigen Kunststoffoptiken im Multilayer-Spritzgießverfahren*. Institut für Kunststoffverarbeitung in Industrie und Handwerk, RWTH Aachen, Abschlussbericht IGF-Forschungsvorhaben Nr. 16862 N, 2014
- [Map14] MAPLESTON, P.: Moulding for optical Applications. *Injection World* 2014 (2014) 9, S. 41-51
- [MF06] MICHAELI, W.; FORSTER, J.: Qualität und Effizienz bei der Herstellung optischer Kunststoffbauteile - Eine Herausforderung für Produktion und Entwicklung. *Tagungsumdruck zum 23. Internationalen Kunststofftechnischen Kolloquium*, S. III-XV (Plenarvortrag), Aachen, 2006
- [MLN+07] MICHAELI, W.; LETTOWSKY, C.; NEUß, A.; HEßNER, S.; KLAIBER, F.: Kunststoff kontra Glas. *Plastverarbeiter* 58 (2007) 10, S. 108-110
- [NN12] N.N.: *Systeme zur Herstellung komplexer optischer Freiformflächen*. Datenblatt, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT, Aachen, Deutschland, 2012
- [MS05] MICHAELI, W.; SCHRÖDER, T.: Wirtschaftliche Bedeutung des Kunststoffs im Bereich optischer Anwendungen, *Tagungsumdruck zum Seminar zur Kunststoffverarbeitung: Optische Bauteile aus Kunststoff*, S. 1-14., Aachen, 2005
- [Wal14] WALACH, P.: *Minimierung des Zentrierfehlers im Werkzeugbau zur Steigerung der Qualität spritzgegossener optischer Präzisionsbauteile*. RWTH-Aachen, Dissertation, 2014 – ISBN: 978-3-95886-008-7
- [ZPD08] ZÖLLNER, O.; PROTTE, R.; DÖBLER, M.: Machbarkeit bewiesen – LED-Linsen aus Polycarbonat. *Plastverarbeiter* 59 (2008) 2, S. 36-38
- [Zöl12] ZÖLLNER, O.: *Kunststoffoptiken im Mehrschichtspritzguß*. Universität Erlangen-Nürnberg, Dissertation, 2012



# Kleinserien wirtschaftlich fertigen – Kombinationen aus Idee, Mensch und Maschine

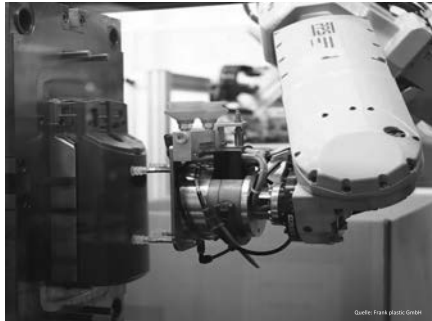
G. Weiss, H. Dietle, PPS Dietle GmbH, Haiterbach

Wer wir  
sind



Kleinserien wirtschaftlich in  
Deutschland herstellen

# Maschine



Wie Kombinationen aus  
Idee, Mensch und Maschine  
Potenziale frei setzen

# Rollfedermontage

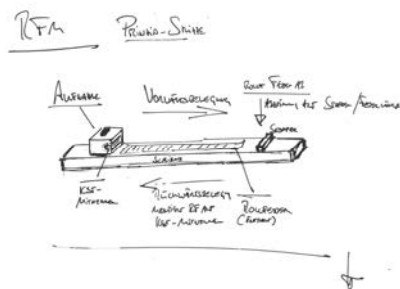
## Aufgabe



## Aufgabe



Idee





## Mensch



## Maschine

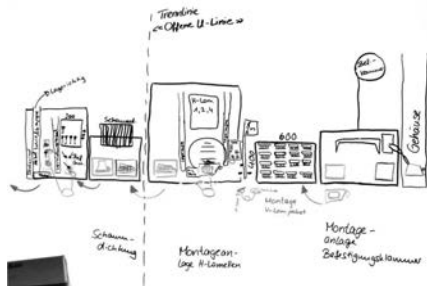


# Montage einer Lüftungsdüse

## Aufgabe



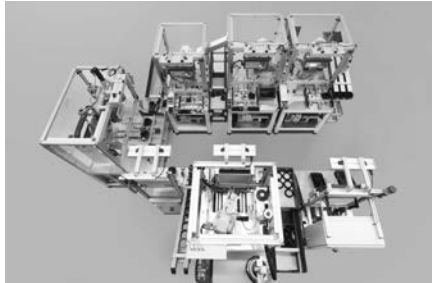
# Idee



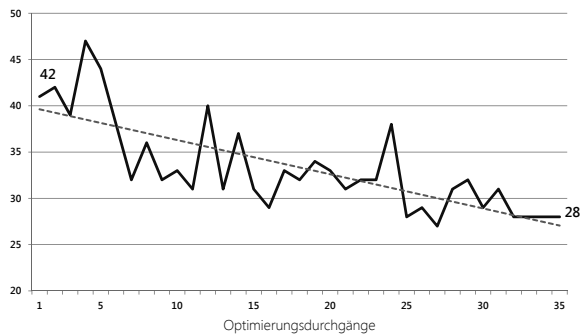
# Mensch



# Maschine



# Taktzeit-Workshop

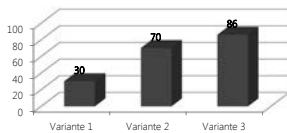


# Ergebnis

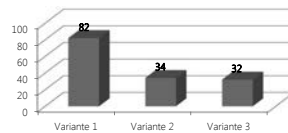


## Fakten

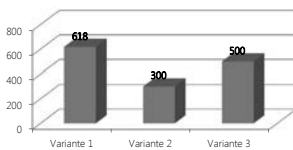
Kosten



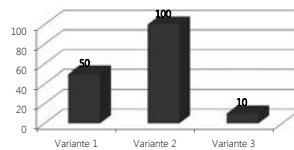
Anzahl Werker



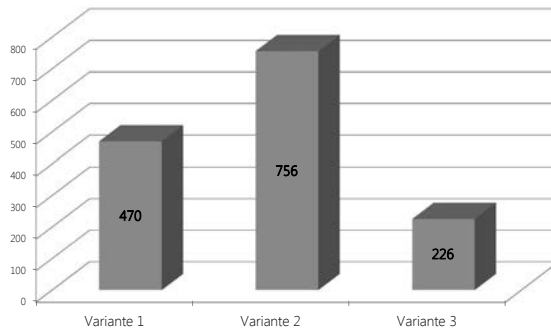
Fläche (m<sup>2</sup>)



Flexibilität



## Gesamt-Ergebnis



## Fazit

# Werkzeugkonzepte für die Kleinserie

Dipl.-Ing. J. Henzler, Robert Hofmann GmbH, Lichtenfels

## Kurzfassung

Auch wenn Aluminiumwerkzeuge im Spritzgusswerkzeugbau oft mit geringen Standzeiten verbunden werden sollten sie auf Grund einer dreifach geringeren Dichte, vierfach besseren Wärmeleitfähigkeit oder sechsfach besseren Temperaturleitfähigkeit verlockend erscheinen. Im Rahmen eines Forschungsvorhabens wurden identische Formteile, gefertigt mittels Aluminium- und Stahlwerkzeug, hinsichtlich ihrer Eigenschaften verglichen und bewertet. Wie anhand der Ergebnisse gezeigt werden konnte, ist es möglich, im Durchschnitt 20 % Zykluszeitersparnis mit einem Aluminiumwerkzeug zu erreichen. Die Abformung bei Kavitäten aus Aluminium ist zwar geringfügig schlechter, allerdings waren Schwindung und Verzug gegenüber Stahl kleiner oder maximal gleich groß. Sicherlich sind Aluminiumwerkzeuge nicht für alle Formteilmassen oder –geometrien einsetzbar, dennoch sollte der Werkstoff gerade bei den Anforderungen kürzester möglicher Zykluszeiten als Alternative berücksichtigt werden. [2] Ein weiterer Vorteil ist die kurzfristige und vergleichsweise kostengünstige Herstellung von Aluminiumwerkzeugen.

## Abstract

Even if injection molds made from aluminum are often associated with short lifetime they should seem compelling because of their three-time smaller density, their better thermal conductivity and their six-time better conductivity of temperature. In context of a research project identical parts were built by molds made from aluminum and steel and were compared and assessed concerning their characteristics. On the basis of the findings it can be shown that with aluminum molds it is possible to save averaging up to 20% of the cycle time. The casting of cavities made from aluminum is slightly worse, however shrinkage and distortion are less or maximum equal to them made from steel. For sure aluminum molds are not useable for all kinds of geometries but if a minimum of cycle time is claimed they should be regarded as an option. [2] Another benefit is the short time production as well as low cost production of an aluminum injection molding tool compared to steel injection molding tool.

## 1. Allgemeine Merkmale

Im direkten Vergleich von Aluminium- und Stahlwerkzeugen stehen sich schnelle und wirtschaftliche Fertigung durch geringe Materialdichten (Aluminium) und hohe Kernfestigkeit ohne nachträgliche Wärmebehandlung (Stahl) gegenüber. Zwar liegt der Aluminiumwerkstoff in den Bereichen Festigkeit, Warmfestigkeit, Polierbarkeit und Maßstabilität hinter dem Stahl, allerdings wird dies wirtschaftlich durch eine bessere Wärmeleitfähigkeit und eine schnellere Materialbearbeitung wieder ausgeglichen.

## 2. Forschungsprojekt mit SKZ Würzburg

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens mit dem SKZ in Würzburg wurden die thermischen Vorzüge eines Aluminiumwerkzeugs im direkten Vergleich zu einem identischen Stahlwerkzeug untersucht. Für die Untersuchungen wurde ein Probekörper jeweils aus zwei teilkristallinen und zwei amorphen Kunststoffen gefertigt und untersucht. Als Werkzeugwerkstoff wurden die Aluminiumlegierung 3.4365 ( Fortal 7075) der Fa. Alcan und der Werkzeugstahl 1.2312 der Fa. Meusburger ausgewählt. [2]

Das für die Untersuchungen verwendete Formteil (Bild1) beinhaltet zwei funktionalisierte Bereiche und eine Längsrippe, welche zur Messung von Oberflächenglanz, Schwindung und Verzug verwendet werden.

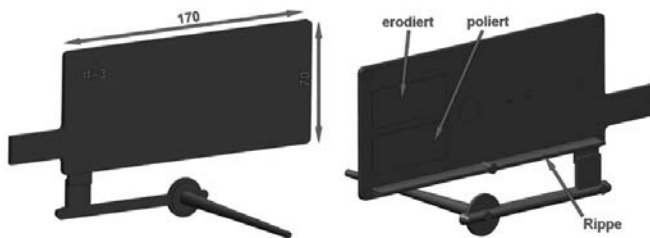


Bild 1: Formteilauslegung [1]

Zur Bestimmung der Oberflächenabformung wird eine Glanzmessung durchgeführt. An der polierten Funktionsfläche bedeutet ein hoher Glanzwert eine gute Abformung, an der erodierten Fläche hingegen verhält sich dies genau umgekehrt (niedriger Glanzwert => gute Abformung). Messungen an der erodierten Oberfläche für die Werkstoffe PE-HD und ABS zeigen eine deutlich schlechtere Oberflächenabformung für das Aluminiumwerkzeug im Vergleich zu Stahl (Bild 2).



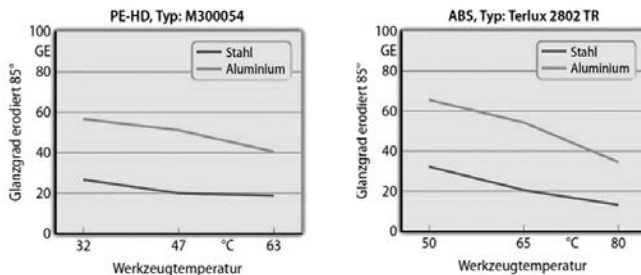


Bild 2: Ergebnisse der Glanzmessung an der erodierten Oberfläche –  
a) links PE-HD – b) rechts ABS [1]

Begründen lässt sich dies durch die höhere Wärmeleitfähigkeit des Aluminiumwerkzeuges, welche zu einer geringeren Kunststoffmasse-temperatur an der Kavitationsoberfläche führt. Die Abformung, speziell an der erodierten Oberfläche, wird dadurch verschlechtert. [2]

Bezogen auf die mechanischen Eigenschaften (betrachtet am E-Modul) des Formkörpers treten bei amorphen Werkstoffen keine großen Differenzen auf, beide Ergebnisse liegen innerhalb eines gewissen Streubereichs (Bild 3a). Bei teilkristallinen Werkstoffen hingegen führt die höhere Abkühlrate im Aluminiumwerkzeug zu einer gehemmten Kristallisation und somit zu geringeren Festigkeitswerten (Bild 3b). [1]

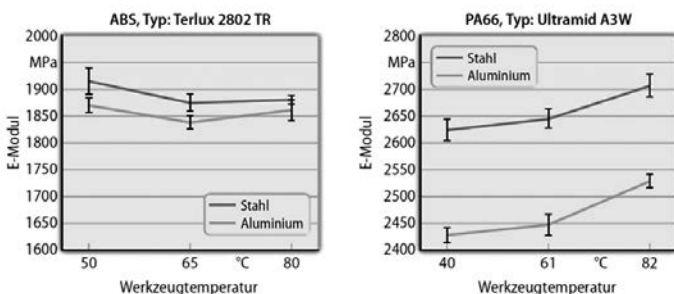


Bild 3: E-Modul der Formteile – a) links amorpher Werkstoff – b) rechts teilkristalliner Werkstoff [1]

Die Untersuchungen zeigen, dass alle Formteile aus dem Aluminiumwerkzeug eine geringere oder maximal gleiche Schwindung im Vergleich zu denen aus dem Stahlwerkzeug aufweisen (Bild 4).

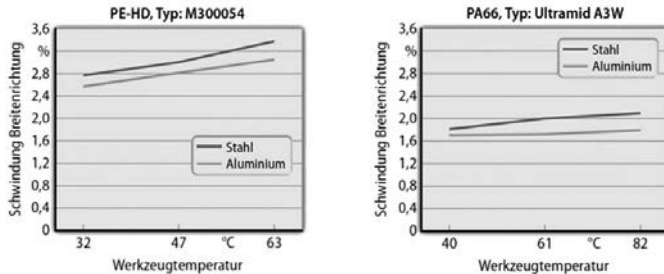


Bild 4: Vergleich der Breitenschwindung [1]

Generell steigt die Schwindung mit zunehmender Werkzeug- und Massetemperatur an. Bei der Betrachtung der Zykluszeit spielt das Aluminiumwerkzeug seine Vorteile ganz klar aus. Im Bereich von hohen Werkzeugtemperatur lässt sich die Zykluszeit durch Nutzung von Aluminiumwerkzeugen um bis zu 28% verkürzen, selbst im Durchschnitt liegt die Einsparung bei noch immer knapp 20%. [1]

### 3. Praxiserfahrungen

Der Einsatz von Aluminiumwerkzeugen in der Praxis macht deutlich, wo Probleme und Möglichkeiten liegen und was beim Einsatz beachtet werden sollte. Die Ausbringrate für Standardmaterialien (PP/ABS) liegt bei etwa 10.000-30.000 Teilen, für beispielsweise ABS/PC oder PA-6 GF30 sinkt diese auf rund 5.000 Teile. Das Haupteinsatzgebiet für Aluminiumwerkzeuge liegt deshalb im Bereich der Klein- und Vorserienwerkzeuge. Dabei wird die Entformung wenn möglich über einfache Schieber oder Losteile dargestellt, um die Werkzeugkosten pro Bauteil so gering wie möglich zu halten. Notwendig beim Einsatz sind turnusmäßige Wartungen mit Nacharbeit von Werkzeuggrenzung und Angusskanal. Es sollte allerdings beachtet werden, dass die größte Beanspruchung beim Rüsten und Anfahren auftritt, so dass die Fertigung größerer Stückzahlen ohne Unterbrechung stets vorzuziehen ist. Aufgrund des geringen E-Moduls von Aluminium unterliegen Losteile oder Schieber starkem Verschleiß. Auch sind daher keine großen Spritzdrücke realisierbar und durch Fehlbedienung können schneller große Schäden am Werkzeug entstehen.

Eine Verarbeitung von Hochtemperaturwerkstoffen mit Werkzeugtemperaturen über 100°C ist auf Grund der geringen Warmfestigkeit des Aluminiums nicht möglich (Bild 5).

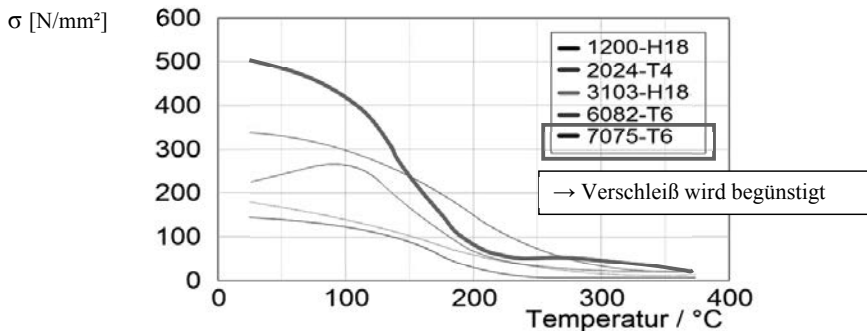


Bild 5: Streckgrenze von Aluminiumlegierungen über der Temperatur [3]

Die Vorteile von Aluminium zeigen sich in der Werkzeugfertigung: Optimierte Fräsprogramme erlauben geringere Bearbeitungszeiten bei größerer Fräser-Standzeit. Dabei kann häufig auf Grund der Einsatzmöglichkeit von entsprechenden kleinen Fräsern von einer kostenintensiven Erodierbearbeitung abgesehen werden. Probleme können bei der Losteilentformung auftreten, bei der das Werkzeug verkratzt werden kann. Abhilfe schafft ein Hybridwerkzeug aus Aluminium mit Stahleinsätze in der Kavität, wo stark beanspruchte Bereiche stabiler ausgelegt werden können. Ein Einsatz in der Serie ist auf Grund der geforderten Ausbringungsmenge und der gestellten Anforderungen an die Maßgenauigkeit meist nicht möglich. Hier kommt es darauf an, dass die Erwartungen des Kunden und die lieferbare Qualität im Vorfeld klar abgestimmt werden.

#### 4. Zusammenfassung

Zusammenfassend ist der Werkstoff Aluminium auf Grund seiner Stoffdaten dem Stahl in vielerlei Hinsicht überlegen. So ist es z.B. möglich, kürzere Werkzeugfertigungszeiten, leichtere Werkzeuge oder kürzere Zykluszeiten mit dem Material zu erzielen. Sicherlich ist der Werkstoff Aluminium nicht für jede Formmasse und Formteilgeometrie geeignet.

Besonders bei der Anforderung nach schnellproduzierbaren kostengünstigen Werkzeugen sollte er jedoch unbedingt als eine Möglichkeit in die Überlegungen einbezogen werden. [1], [2]

- [1] Hennrich, B.; Bastian, M.; Heidemeyer, P.: Stahl oder Aluminium, das ist hier die Frage. Kunststoffe 07/2015, S. 56-59
- [2] SKZ Würzburg: Aluminiumwerkzeuge für den Serieneinsatz. Forschungsbericht
- [3] <http://aluminium.matter.org.uk/content/html/ger/default.asp?catid=171&pageid=2144416557> (26.11.2015)

# **Material follows function**

## **Zukunftsperspektiven für die Kunststoffe von morgen**

Dipl.-Ing. (FH) **E. Foltin**, Foltin Future Consulting, Sinzig

### **Kurzfassung**

Im Vortrag werden die Veränderungen beschrieben, die sich aus dynamischen Technologietrends und neuen Nutzerverhalten ergeben.

Aus Trendanalysen, gekoppelt mit der Marktbeobachtung, werden die Anforderungen für die Materialauswahl hergeleitet. An praktischen Beispielen und Designkonzepten werden die neuen Anforderungen an Materialien und Technologien dargestellt.

### **Trends aufnehmen, begleiten und umsetzen:**

- Konvergenz: Verschmelzung von Technologien, Wertschöpfungsketten, Mensch und Maschine
- Dynamik: iterative Prozesse verkürzen die Entwicklungszyklen
- Virtualisierung: Zugang zu professionellen Produktionsprozessen
- Funktionalisierung: Wechsel von Design follows function zu Material follows function
- Individualisierung: gezielte Eigenschaftsprofile durch generative Fertigung
- Materialisierung: virtuelle Welten erlebbar machen

### **Paradigmenwechsel durch Digitalisierung:**

- Gewohnheiten und existierende Bewertungsgrundsätze anpassen an neue Maßstäbe
- Vernetzung als Schlüsselfaktor verstehen
- Managen, was erfasst und gemessen wird
- Daten als Asset nutzen
- Die Prozesseinheit wird zum interaktiven Produktionsassistenten
- Geschäftsmodelle in neuen Kontext stellen



# Zukunft gestalten – Strategisches Design von Kunststoffbauteilen

S. Schneider, Miele & Cie. KG, Gütersloh



TO KEEP IN MIND  
2025 MORE THAN 30% OF GERMANS WILL BE OVER 60

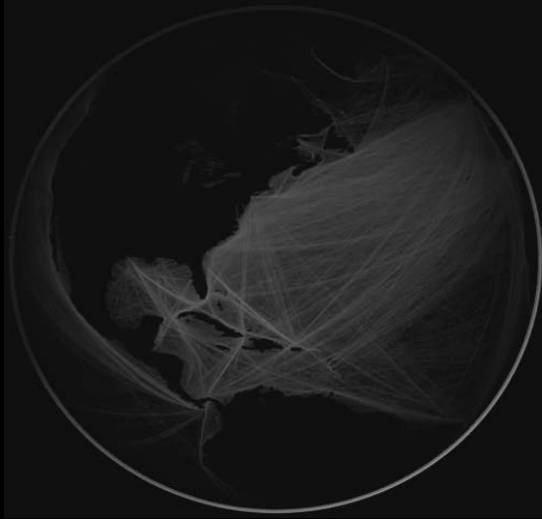


TO KEEP IN MIND  
2025 60% OF ALL PEOPLE WILL LIVE IN CITIES





TO KEEP IN MIND  
MEGAREGIONS AND NETWORKS WILL BE PREDOMINANT



TO KEEP IN MIND  
ENERGY COSTS WILL RISE | ENERGY SUPPLY WILL BE UNSTABLE



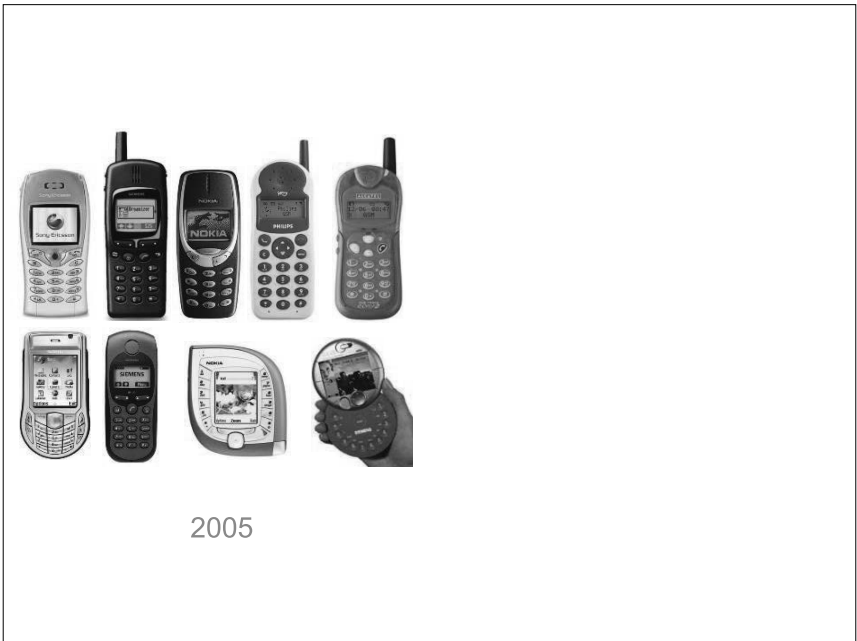
TO KEEP IN MIND  
THERE WILL BE A CLIMATE CHANGE



TO KEEP IN MIND  
2001 IS NOW



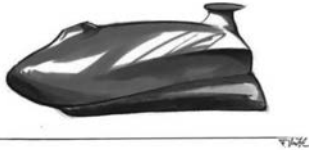




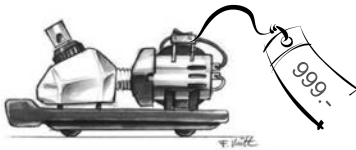


Klassische Produktentwicklung

„Designers Desire“



„Controllers Choice“



„Marketings Master Care“

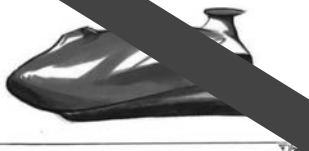


„TECHNICANS TOOLS“

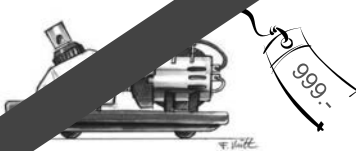


Klassische Produktentwicklung

„Designers Desire“



„Controllers Choice“



„Marketings Master Care“

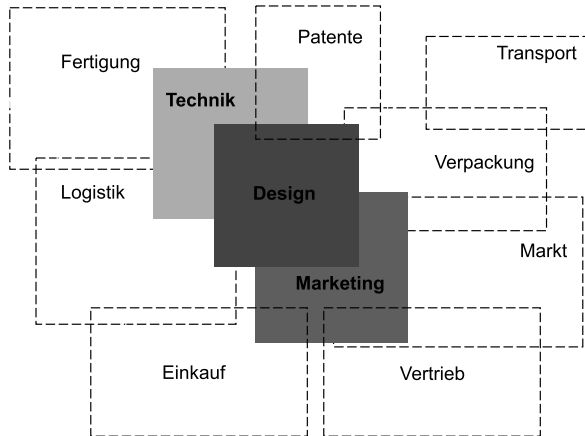


„TECHNICANS TOOLS“



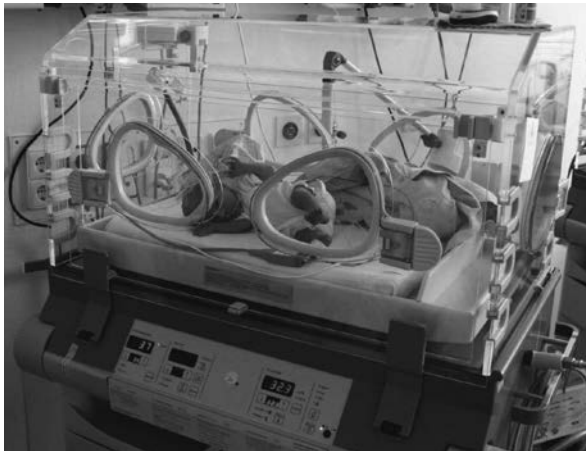
## Warum Design?

Design als integrativer Faktor in der Produktentwicklung



## Warum Design ?

Wie kann man die Herstellkosten dieses Gerätes für Entwicklungsländer um 90% senken ?



## Warum Design ?

Gar nicht. Man kann sie um 99% senken.

Designer können „Rulebreaker“ sein.  
(Wenn man sie lässt)



HPI Stanford

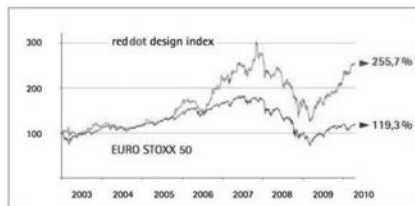
## Warum Design, Strategie, Zukunft ?

Studien zum Thema



© Design Council February 2004

Design Council (Hrsg.) (2004), S. 2



<http://red-dot.org> (Stand: 16.08.2011)

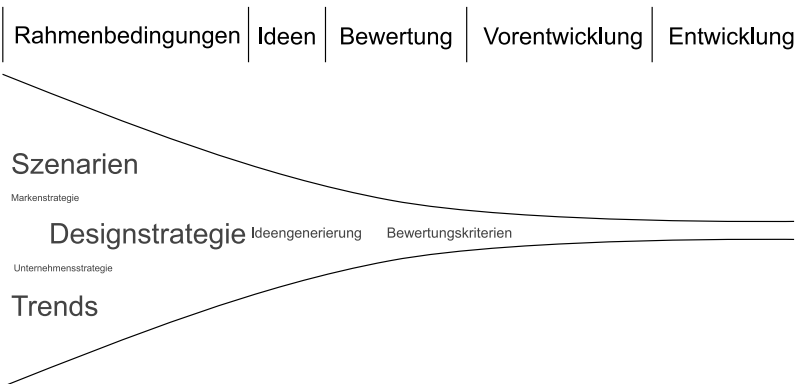


## Warum Design, Strategie, Zukunft ?

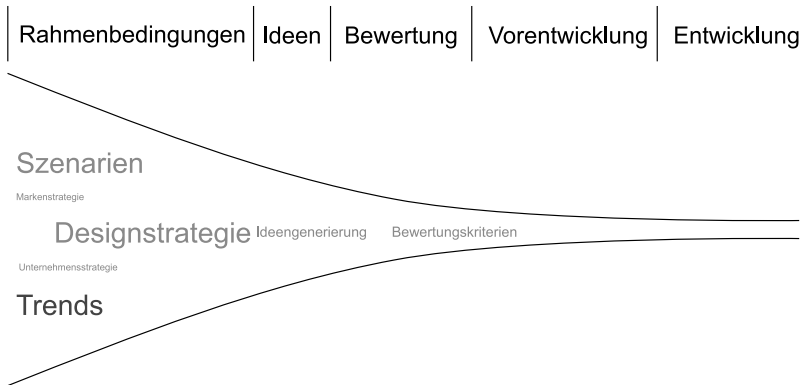
Status der Design Integration	Umsatzentwicklung in den Letzten 5 Geschäftsjahren in DKK	Entwicklung Mitarbeiter in %
Stufe 4: Design als Innovator	+ 13,3 Mio	+ 22,9
Stufe 3: Design im F&E Prozess	+ 12,1 Mio	+ 20,8
Stufe 2: Design ist "Styling"	+ 5,4 Mio	+ 19,6
Stufe 1: Kein Design	+ 5,3 Mio	+ 14,5

Vgl. <http://en.ddc.dk> Basis 825 Unternehmen (Stand: 22.07.2011)

## Wo im Entwicklungsprozess findet „Strategisches Design“ statt ?



## Wo im Entwicklungsprozess findet „Strategisches Design“ statt ?



## Was ist ein Trend ?

Drei Interpretationen

Trends beziehen sich auf ein individuelles Gefühl eines Meinungsführer



Prof. Dr. Blümelhuber 2012

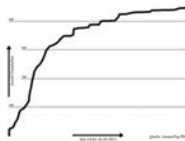
## Was ist ein Trend ?

Drei Interpretationen

Trends beziehen sich auf ein individuelles Gefühl eines Meinungsführer



Trends repräsentieren die langfristige Komponente einer Zeitreihe



Prof. Dr. Blümelhuber 2012

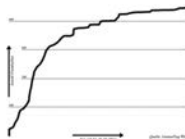
## Was ist ein Trend ?

Drei Interpretationen

Trends beziehen sich auf ein individuelles Gefühl eines Meinungsführer



Trends repräsentieren die langfristige Komponente einer Zeitreihe

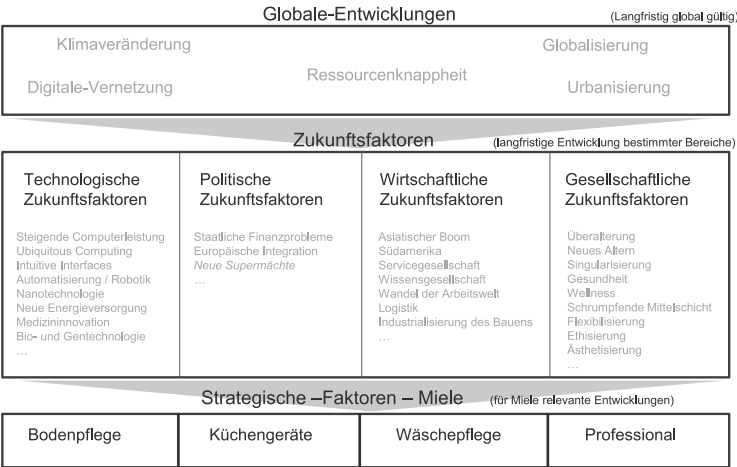


Trends sind eine soziokulturelle Innovation



Prof. Dr. Blümelhuber 2012

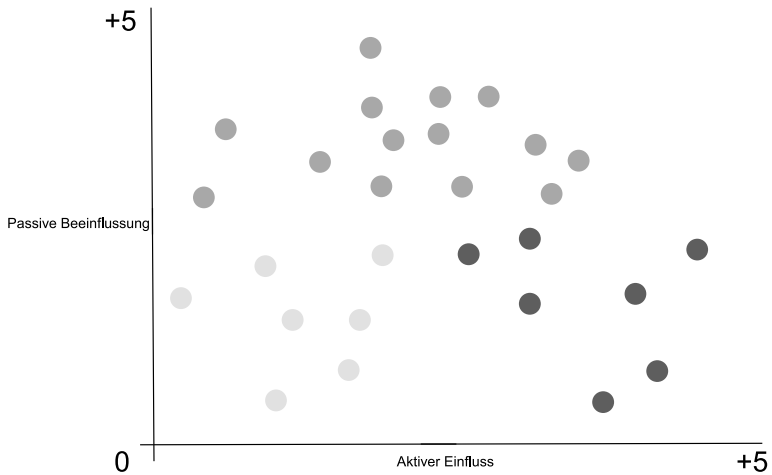
# Unser Trendmodell



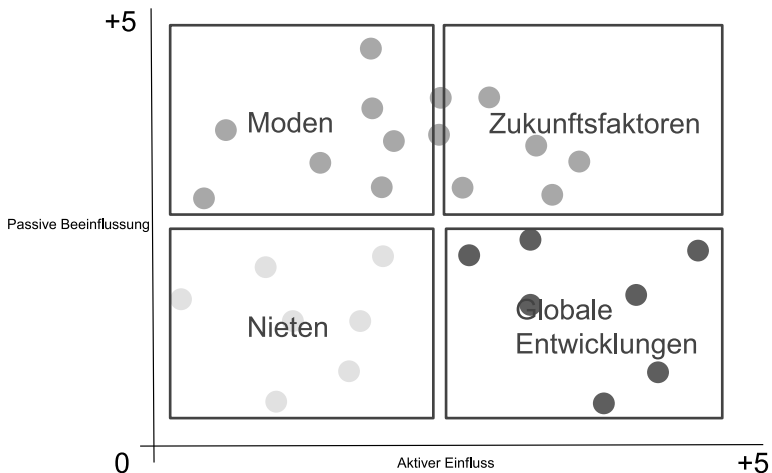
## Wie ordnet man Trends in die unterschiedlichen Ebenen ein ?

	Trend 1	Trend 2	Trend 3	Trend 4	Trend 5	Trend 6	Trend 7	Aktiv
Trend 1		5	5	5	4	5	4	4,7
Trend 2	3							
Trend 3	4							
Trend 4	1							
Trend 5	3							
Trend 6	2							
Trend 7	4							
Passiv	2,83							

### Wie unterscheidet man Trends ?

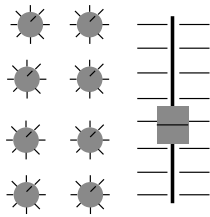


### Was ist ein Trend ?

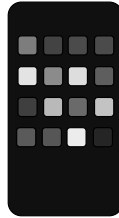


## Vom komplexen Interface zur künstlichen Intelligenz

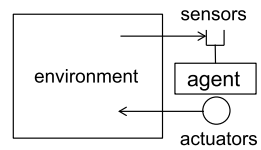
Subtitle



Gestern



Heute



Morgen

Produkte der Zukunft werden ein reduziertes oder sogar gar kein Interface mehr haben. Produkte werden über Sensoren oder Schnittstellen Informationen mit anderen Produkten austauschen, verarbeiten und Aktionen ausführen. Sie werden sich selbständig optimieren.

## Wo im Entwicklungsprozess findet „Strategisches Design“ statt ?

Rahmenbedingungen | Ideen | Bewertung | Vorentwicklung | Entwicklung

Szenarien

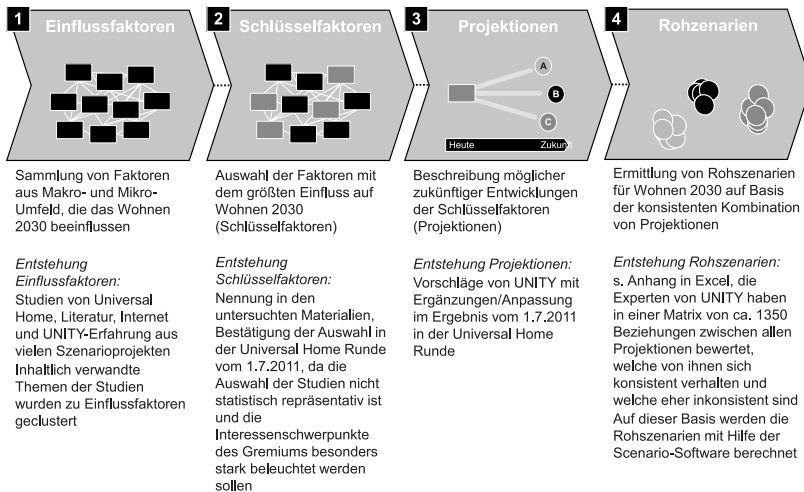
Markenstrategie

Designstrategie Ideengenerierung Bewertungskriterien

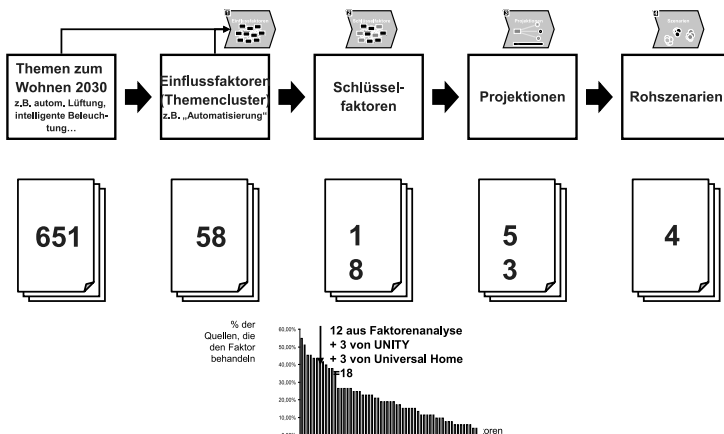
Unternehmensstrategie

Trends

## Rohszenario-Entwicklung in Phasen Überblick Methode



## Einflussfaktoren



Anzahl ausgewerteter Studien und Quellen: 53

Die Häufigkeit der Nennung von Faktoren lässt auf eine hohe Einbindung im Gesamtsystem Wohnen 2030 schließen, da sie in vielen Quellen mit variierendem Untersuchungsgegenstand relevant sind.

# 1. Persönliches soziales Lebensmodell

## Gesellschaft - Projektionen A-C

**Definition:** Das persönliche soziale Lebensmodell beschreibt die Anzahl der Personen in einem Haushalt und deren Beziehung untereinander. Das heißt allerdings nicht zwingend, dass sich diese ein Einkommen teilen. In den Szenarien ist es möglich, den einzelnen Projektionen einen prozentualen Anteil an der Gesamtbevölkerung zuzuordnen, sie können parallel auftreten.

### A: Traditionelles Modell



- Durchschnittliche Haushaltsgröße bleibt konstant
- Familie ist wichtig, Paare leben zusammen mit ihren Kindern
- Ein Elternteil verdient das Geld, der andere kümmert sich um die Kinder
- Nutzung der Wohnung als "Nest" für die Familie, Freizeit wird zu einem wesentlichen Teil zu Hause verbracht, möglichst gemeinsam

### B: Mehrgenerationenhaushalt



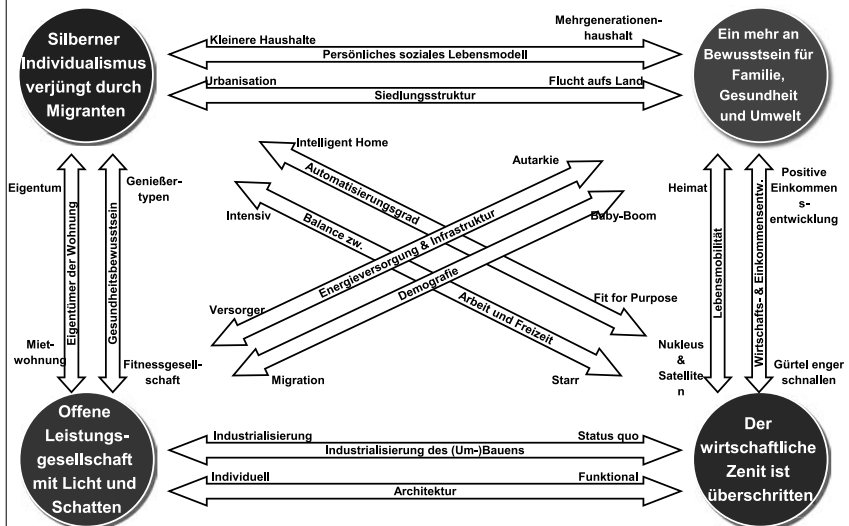
- Durchschnittliche Haushaltsgröße steigt
- Familie ist wichtig, Kinder, Eltern und Großeltern leben zusammen in einem Haushalt. Ältere Singles und junge Menschen leben in Wohngemeinschaften und/oder Mehrgenerationenhäusern. Geschiedene Paare finden neue Partner und gründen Patchworkfamilien, die Familienmitglieder sind nicht notwendigerweise miteinander verwandt.
- Eltern arbeiten, Großeltern/Mitbewohner kümmern sich um die Kinder
- Nutzung der Wohnung als Gemeinschaftsraum, in dem sich alle Generationen begegnen

### C: Kleinere Haushalte

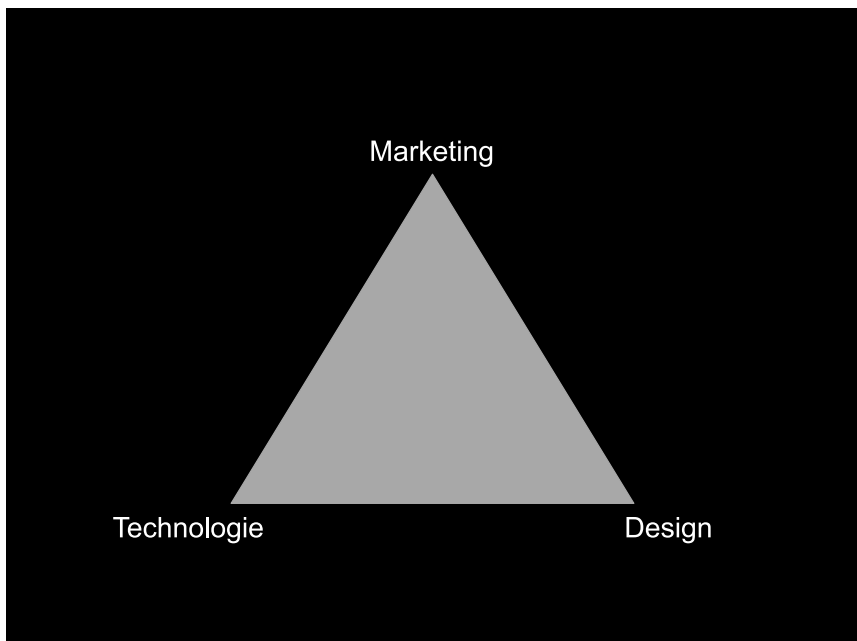
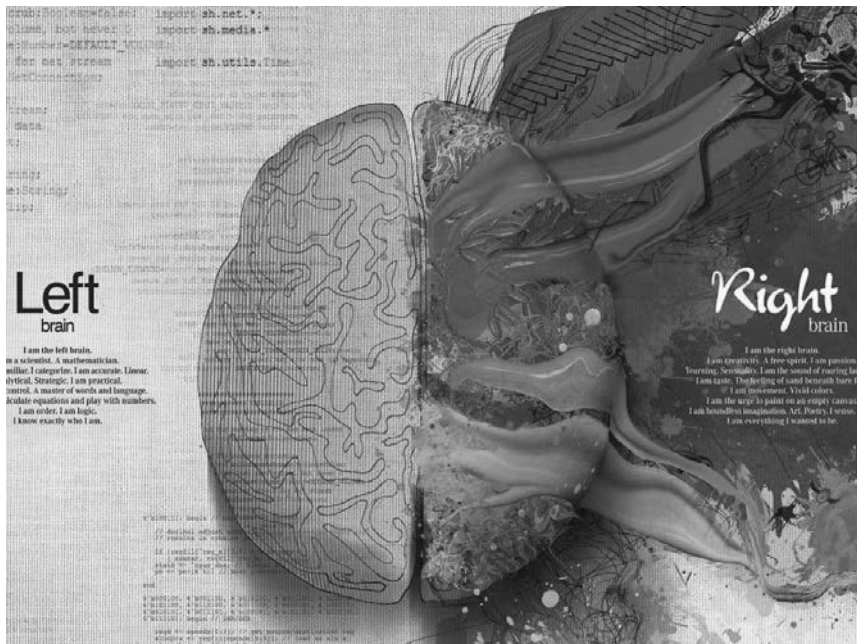


- Kleinerer Haushalt
- Mehr Singles, weniger traditionelle Familien, Paare als „DINKS“
- Jeder sorgt für das Einkommen seines Single-Haushalts, ältere Generationen sind dank des Einkommens aus Arbeit, Pension und Ersparnissen unabhängig
- Nutzung der Wohnung als Schlaf- und ggf. auch Arbeitsstätte, Wohnung als Erholungsraum

## Unterschiede der Szenarien (Auszug)







FORM FOLLOWS CONTENT !



SVEN SCHNEIDER



ISBN 978-3-18-23**4344**-8