

VDI

K

KUNSTSTOFFTECHNIK

Blasformen 2017

KUNSTSTOFFTECHNIK

Blasformen 2017

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 2017

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

Printed in Germany

ISBN 978-3-18-234350-9

Inhalt

Einführungsvortrag

Verpackungsgesetz und Circular Economy Package – künftige Anforderungen an die Gestaltung und Verwertung von Verpackungen

Dr. J. Bruder, IK Industrievereinigung Kunststoffverpackungen e.V., Bad Homburg 1

IT-Sicherheit im Umfeld Industrie 4.0 – IT-Sicherheitsbedrohungen risikogerecht begegnen

Prof. Dr. rer. nat. D. Loomans, M. Matz, Loomans & Matz AG, Mainz 9

Innovative Werkzeugtechnologien

High Output Blowmolding – Technologien im Blasformen für hohe Ausstossleistungen

Dipl.-Ing. A. Kandt, Bekum GmbH, Berlin 15

Vertikalextruder für Blasformanwendungen – Hochleistungsextruder bieten neue Einsatzmöglichkeiten

Dipl.-Ing. M. Balzer, GIFA Plastifiziertchnik Wurtscheid GmbH, Hennef 25

Der bisher effizienteste Antrieb für die Extruder-Branche

Dipl.-Ing. (FH) G. Pankratz, Pikatron GmbH, Usingen 33

Industrie 4.0 ... mehr als ein Hype! – Herausforderungen an Kunden und Anbieter

Dipl.-Ing. (FH) A. Winter, Bosch Rexroth AG, Lohr am Main 53

Trends aus der Verarbeitung

Rohstoffaufbereitung / Rohstoffversorgung – Lagern, Fördern, Trocknen, Dosieren / Mischen, Steuern

Dipl.-Ing. (FH) A. Koschmieder, motan-colortronic GmbH, Friedrichsdorf 69

Möglichkeiten und Grenzen der Energieeinsparungen

B. Stipsits, Blue Air Systems GmbH, Kundl, Österreich 81

Die neue Generation der Saugblasmaschine

Dipl.-Ing. M. Holbach, Kautex Maschinenbau GmbH, Bonn 91

Plasmaoberflächenveredelung für das Blasformen

Dr. rer. nat. O. Kayser, Dreistegen GmbH, Monschau 101

Effiziente Fertigung mit modernen Materialien und Werkstoffen

Verarbeitung von Biokunststoffen im Extrusionsblasformen im Rahmen des Verbundprojektes „Verarbeitung für Biokunststoffen“

*Dr.-Ing. O. Bruch, Dipl.-Ing. J. P. Hochstätter, MBA M. Stender,
Dr. Reinold Hagen Stiftung, Bonn*

111

Blasformteile mit neuartiger Schaumstruktur – Physikalisches Schäumen mit expandierbaren Mikrosphären

*Dipl.-Ing. (FH) C.-O. Danz, Dr. K.-C. Danz, kcd Kunststoffe,
Additive und Beratung GmbH, Weimar*

123

Produktsimulation und Aktuelles zur Werkzeugproduktion

Aktuelle Entwicklungen in der Produktsimulation blasgeformter Kunststoffhohlkörper – Verbesserungspotenziale durch Berücksichtigung des zeit- und prozessabhängigen Materialverhaltens

*M. Eng. P. Michels, Hochschule Bonn-Rhein-Sieg, Sankt Augustin;
Dr.-Ing. O. Bruch, M. Eng. D. Grommes, Dr. Reinold Hagen Stiftung, Bonn*

135

Prozessanalytische Untersuchungen zum Blasformen von Silikonkautschuk unter Einsatz eines temperierten Blaskopfs

*Prof. Dr.-Ing. C. Hopmann, M. Eng. S. Schäfer,
Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV) an der RWTH Aachen, Aachen*

149

3D-Printing – Funktionsintegration durch 3D-Druck im Werkzeugbau

Dipl.-Ing. (FH) G. Hofmann, Werkzeugbau Siegfried Hofmann GmbH, Lichtenfels

163

Sind selektiv lasergeschmolzene Blasköpfe eine Option für die Zukunft?

*Dr.-Ing. H. Groß, Dr. Groß Kunststoff-Verfahrenstechnik, Roßdorf;
S. Groß, GroKo, Roßdorf; J. M. Nobrega, J. P. O. Vidal,
i3N/IPC, University of Minho, Guimaraes, Portugal*

173

Verpackungsgesetz und Circular Economy Package – künftige Anforderungen an die Gestaltung und Verwertung von Verpackungen

Dr. J. Bruder,
IK Industrievereinigung Kunststoffverpackungen e.V., Bad Homburg

Kurzfassung

Es werden der Aufbau und der Inhalt der Entwürfe zum deutschen Verpackungsgesetz und zum EU Circular Economy Package erläutert. Gleichzeitig wird auf den aktuellen Stand des Gesetzgebungsverfahrens eingegangen. Besonderes Augenmerk wird auf die Anforderungen zu höheren Recyclingquoten sowie zum recyclinggerechten Design, zum Einsatz von Recyclaten und nachwachsenden Rohstoffen gelegt. Bereits erarbeitete Vorschläge zur recyclinggerechten Gestaltung von blasgeformten Verpackungen wie HDPE- oder PP-Flaschen werden vorgestellt und kurz erörtert.

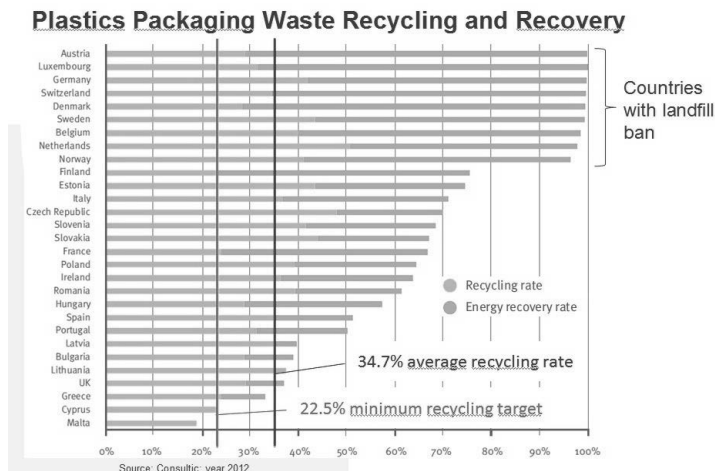
1. IK im Überblick

Die IK Industrievereinigung Kunststoffverpackungen e.V. ist der Interessenvertreter der Hersteller von Kunststoffverpackungen, die auf dem deutschen Markt aktiv sind. In der IK sind mehr als 300 Mitgliedsunternehmen organisiert, die ca. 80% des deutschen Marktes gemessen am Umsatz präsentieren. Die IK vertritt damit eine Branche mit über 90.000 Beschäftigten, einem Jahresumsatz von ca. 14 Milliarden Euro sowie einer Produktionsmenge von 4,3 Mio. t. Das entspricht über 20% der europäischen Produktion von Kunststoffverpackungen. Die IK-Mitglieder sind in produkt- bzw. marktorientierten Fachgruppen organisiert und arbeiten darüber hinaus in vielen produktübergreifenden Gremien (z.B. Arbeitsgruppen zu Bioplastics, Food Contact, Umwelt und Nachhaltigkeit, Qualitätssicherung, Compliance u.a.) mit. Blasformen ist in den folgenden Fachgruppen die dominante Technologie: Flaschen, Fässer/Kanister, IBC. Die IK bietet eine Reihe von Serviceleistungen für die IK-Mitglieder an, so unter anderem den IK Nachhaltigkeitsbericht, die IK-Initiative Null-Granulat-Verlust, den IK-Eco-Calculator, die Gemeinschaftsinitiative mit dem französischen Verband zum Verpackungspreis „PacktheFuture Award“, Weiterbildungen zu Thema Lebensmittelkontakt oder

auch eine Reihe von technischen Dokumentationen, z.B. zur Anwendung und Handhabung von Fässern, Kanistern und IBCs.

2. Ursachen der politischen Diskussion über Kunststoffverpackungen

Bevor auf politische Regelungen eingegangen wird, werden kurz Ursachen der insbesondere sich an Kunststoffverpackungen festmachenden politischen Diskussion untersucht. Dabei wird insbesondere die Meeresverschmutzung weltweit durch Kunststoffabfälle, darunter insbesondere durch Kunststoffverpackungen, herausgestellt. 80% der ca. 8 Mio. Tonnen Kunststoffabfälle, die jährlich im Meer weltweit landen, kommen von Land und ca. 20% von Schiffen (einschließlich Fischerei). Die landbasierten Abfälle werden durch eine fehlende abfallwirtschaftliche Infrastruktur in entsprechenden Ländern, aber auch durch einen Mangel an Umweltbewusstsein, fehlender Information und traditionellem Verhalten verursacht. Auch in Europa sind die Unterschiede in der Verwertung von Kunststoffabfällen und insbesondere Kunststoffverpackungen erheblich, siehe Bild 1.



Ein weiterer Aspekt, warum Kunststoffverpackungen die besondere Aufmerksamkeit der Politik auf sich ziehen, ist darin zu sehen, dass einzelne Arten von Kunststoffverpackungen, insbesondere Tragetaschen und andere Einwegartikel, als Ausdruck einer Ex-und-Hopp-Gesellschaft gesehen werden und deren Verwendung durch verschiedene Maßnahmen zu-

rückgedrängt werden soll. Die enorme Entwicklung der Herstellung und Verwendung von Kunststoffverpackungen in den letzten 20 Jahren hat dazu geführt, dass Kunststoff sich zum dominanten Verpackungsmaterial entwickelt hat. 63% der gesamten Füllgutmenge im privaten Endverbraucherbereich wird in Kunststoffverpackungen verpackt, obwohl das Gewicht der Kunststoffverpackungen bezogen auf den gesamten Verpackungsmarkt nur 24% beträgt. All diese Faktoren sowie die im Vergleich zu anderen Materialien (Metall, Glas, Papier) noch geringeren Recyclingquoten tragen v.a. dazu bei, dass Kunststoffverpackungen zunehmend politischen Regelungen unterliegen.

3. Das deutsche Verpackungsgesetz

Gegenwärtig befindet sich der Entwurf eines Verpackungsgesetzes im Parlamentarischen Verfahren, d.h. es ist davon auszugehen, dass Bundestag und Bundesrat noch in dieser Legislaturperiode, d.h. bis zur Sommerpause 2016, das Verpackungsgesetz verabschieden. Das Verpackungsgesetz soll die bisherige Verpackungsverordnung ablösen, es ist das vorläufige Ergebnis einer ca. 8jährigen Diskussion über ein Wertstoffgesetz. Mit einem Wertstoffgesetz wurde ursprünglich versucht, auch die Sammlung und Verwertung von stoffgleichen Nichtverpackungen aus Kunststoff und Metall (Haushaltswaren, Küchenartikel, Badartikel, Gartenartikel, Spielzeug) gemeinsam mit Verpackungen zu ermöglichen. Da hierzu aber keine Einigung zwischen Kommunen und Privatwirtschaft über die Organisationshoheit der Wertstofftonne erzielt werden konnte, hat sich der Gesetzgeber dafür entschieden, den strittigen Punkt der stoffgleichen Nichtverpackungen auszuklammern und in einem Verpackungsgesetz grundlegende Weiterentwicklungen der bisherigen Verpackungsverordnung vorzunehmen. Die wichtigsten Punkte dabei sind:

- Errichtung einer Zentralen Stelle als privatwirtschaftlich organisierte, neutrale Registrierungs- und Kontrollinstitution für Inverkehrbringer, duale Systeme und Sachverständige/Wirtschaftsprüfer
- die Festlegung deutlich höherer Verwertungsziele
- die Verknüpfung von Lizenzentgelten mit Anforderungen an ein verbessertes recyclinggerechtes Design der Verpackungen sowie einen höheren Einsatz von Recyclaten und nachwachsenden Rohstoffen.

Die Recyclingziele im Vergleich zur gegenwärtigen Verpackungsverordnung sind in Bild 2 aufgeführt.

Recyclingquoten für Verpackungen in Deutschland

➤ Gesamtrecyclingquote für Leichtverpackungen (Kunststoff, Metall, Getränkekartons): mindestens 50%

➤ Materialspezifische Mindestrecyclingmengen (Basis: Lizenzierte Menge)

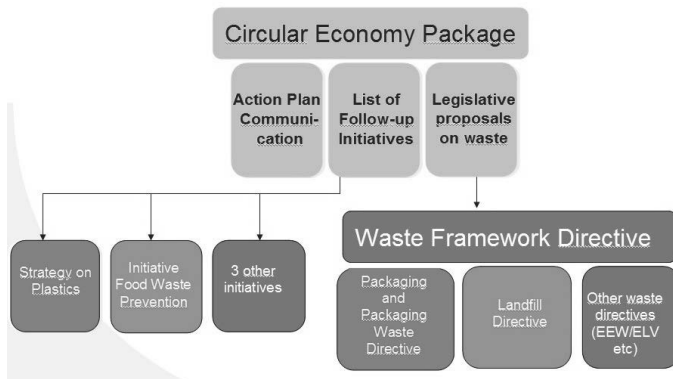
	Aktuell	2019	Ab 2022
•Glas	75%	80%	90%
•Papier/Pappe/Karton	70%	85%	90%
•Stahl/Weißblech	70%	80%	90%
•Aluminium	60%	80%	90%
•Getränkekarton	60%	75%	80%
•Kunststoff (Verwertung)	60%	90%	90%
•Kunststoff (werkstoffliche Verwertung)	36%	58,5%	63%

➤ Der Gesetzgeber prüft bis Ende 2024 ob die Quoten anzuheben sind

Grundlegend neu ist im Verpackungsgesetz der Paragraph § 21, der sich mit der ökologischen Gestaltung der Beteiligungsentgelte, d.h. der Lizenzentgelte bei den dualen Systemen befasst. Danach sollen die Systeme bei der Bemessung der Lizenzentgelte Anreize schaffen, um bei der Herstellung von Verpackungen die Verwendung von Materialien und Materialkombinationen zu fördern, die möglichst gut recycelt werden können. Dabei ist der gegenwärtige Stand der Sortierung und Verwertung zugrunde zu legen. Gleichmaßen soll der Einsatz von Recyclaten und nachwachsenden Rohstoffen unter Berücksichtigung der gesamtökologischen Auswirkungen gefördert werden. Gegenwärtig arbeitet eine Experten-Gruppe aus der gesamten Wertschöpfungskette an Vorschlägen, wie der §21 konkret umgesetzt werden könnte.

4. EU-Circular Economy Package

Im Dezember 2015 wurde von der EU-Kommission das EU-Kreislaufwirtschaftspaket vorgestellt. Grundlegendes Ziel ist die Umwandlung der linearen Wirtschaftsform in eine Kreislaufwirtschaft mit den Teilzielen Sicherung der Rohstoffbasis, Abfallvermeidung, Klimaschutz, nachhaltiges Wachstum und wachsende Beschäftigung, Unterstützung von Innovationen und internationale Wettbewerbsfähigkeit. Diese grundlegenden Ziele sind zusammengefasst in einem Aktionsplan, in einer Liste von Initiativen sowie in Änderungsvorschlägen zu EU-Abfallrichtlinien, siehe Bild 3.



Für die Kunststoffindustrie von besonderem Interesse sind die Änderungen zur EU-Verpackungs- und Verpackungsabfallrichtlinie sowie die Kunststoffstrategie. Von Relevanz sind auch die EU-Deponierichtlinie sowie die Initiative zur Vermeidung von Lebensmittelverlusten. Da europaweit rund 38% der Kunststoffabfälle noch deponiert werden (ca. 9,5 Mio. t) ist ein Deponieverbot von Kunststoffabfällen im Interesse der Kunststoffindustrie, um die Verwertung dieses wertvollen Rohstoffes zu steigern. Hier bleibt der Vorschlag der Politik hinter den Forderungen der Industrie zurück, die für 2025 „Zero Plastics to Landfill“ fordert.

Die Entwürfe zu den Abfallrichtlinien enthalten folgende Ziele:

- 65% Recycling des Haushaltsabfalls bis 2030
- 10% maximale Deponierung von Haushaltsabfall bis 2030
- 75% Recycling des Verpackungsabfalls bis 2030
- 55% Recycling von Kunststoffverpackungen bis 2025 (gegenwärtiges Ziel: 22,5%)

Die für die meisten EU-Mitgliedsstaaten äußerst ambitionierten Recyclingziele, insbesondere für Kunststoffverpackungen (im Vergleich: Recyclingquote in Deutschland zzt. rund 50%) werden begleitet durch eine intensive Diskussion über die Vereinheitlichung der Berechnung, der Definition von Messpunkten, um vergleichbare Ergebnisse europaweit zu erhalten. Darüber hinaus sollen durch geeignete Maßnahmen die Vermeidung und auch die Wiederverwendung von Verpackungen gestärkt werden. Von nicht minder großer Bedeutung für die Kunststoffindustrie ist die „Strategy on Plastics“, in der speziell für das Material Kunststoff und die daraus hergestellten Produkte mittel- und langfristige Anforderungen gestellt werden, die sich (noch) nicht in Gesetzesinitiativen niederschlagen.

Während mit dem Abschluss des Gesetzgebungsverfahrens zu den Abfallrichtlinien frühestens im Jahr 2018 zu rechnen ist, soll die Kunststoffstrategie bereits Ende 2017 vorgelegt werden.

Im Januar 2017 wurde hierzu eine Roadmap veröffentlicht, in der drei wesentliche Inhalte dieser Strategie bekanntgegeben wurden.

- 1.) Die Roadmap hebt die Abhängigkeit der Kunststoffherstellung von fossilen Rohstoffen hervor, die auf lange Sicht durch die Nutzung alternativer Stoffe wie Recyclingmaterialien, Biomasse und Kohlenstoffdioxid gelöst werden soll. Hierzu sollen derzeit bestehende technische Barrieren durch die Entwicklung innovativer Technologien überwunden werden. Genannt wird etwa die Möglichkeit der Verarbeitung von Mischkunststoff-Abfällen. Auch sollen finanzielle Anreize geschaffen werden, die für eine Diversifizierung von Rohstoffen sorgen.
- 2.) Die niedrige Wiederverwendungs- und Recyclingrate von Kunststoff ist zu erhöhen. Grund hierfür seien zum einen schwache wirtschaftliche Anreize, Recycling-Kunststoffe in Produkten zu verwenden sowie die Produktgestaltung, die oftmals auf eine einmalige Nutzung ausgelegt ist. Hier sollten nach Meinung der Kommission stärkere Anreize für einen Markt für Sekundärkunststoffe sowie ein auf Recycling ausgerichtetes Produktdesign geschaffen werden.
- 3.) Die Menge an Kunststoffabfällen, die in die Umwelt, insbesondere ins Meer, gelangen, ist signifikant zu reduzieren. Um insbesondere den negativen Auswirkungen auf die biologische Meeresvielfalt, die Gesundheit des Menschen und auf die Wirtschaft vorzubeugen, strebt die Kommission eine 30%ige Reduktion des Meeresabfalls an. Zudem soll ein eindeutiger Nachhaltigkeitsrahmen für biologisch abbaubare Kunststoffe entwickelt werden. Schließlich werden auch Sensibilisierungs- und Aufklärungsmaßnahmen für Verbraucher gefordert.

Wesentliche Impulse zur Erarbeitung der Kunststoffstrategie durch die EU-Kommission werden erwartet aus den beiden Berichten der Ellen MacArthur-Foundation, „New Plastics Economy“ (2016 und 2017).

In Deutschland haben die Entwürfe zum Verpackungsgesetz sowie zum Circular Economy Package bereits eine intensive Diskussion in der Kunststoffwertschöpfungskette verursacht, wie die höheren Recyclingquoten zu erreichen sind und auf welche Art und Weise das Design von Kunststoffverpackungen im Sinne der Recyclingfähigkeit verbessert werden kann ohne funktionelle Nachteile dabei in Kauf zu nehmen. Ein Beispiel für ein solches Diskussionsforum ist der von der IK initiierte „Runde Tisch Eco-Design von Kunststoff-verpackungen“ mit Experten aus der gesamten Kette, der Wissenschaft und Verbraucher-verbänden. Er hat

es sich zur Aufgabe gemacht, einen Leitfaden zum Eco-Design zu erarbeiten. Dieser Leitfaden soll schwerpunktmäßig den Managementprozess bei der Verpackungsentwicklung nachzeichnen, die Zielkonflikte benennen und Vorschläge für den Umgang damit machen sowie bestehende Tools und Heurismen in einen solchen Leitfaden integrieren (siehe auch <http://ecodesign-packaging.org>).

5. Recyclinggerechtes Design für blasgeformte Verpackungen

Die Recyclingfähigkeit einer Verpackung ist ein wesentlicher Bestandteil des Eco-Designs, jedoch nicht mit dem Eco-Design gleichzusetzen. Zum Eco-Design gehört ein ganzer Kanon weiterer Kriterien wie optimaler Produktschutz, Materialeffizienz, Carbon Footprint und vieles andere mehr. Die Recyclingfähigkeit einer Verpackung kann mitunter in Zielkonflikten mit anderen Verpackungsanforderungen stehen, wie der Vermeidung von Verpackungsabfällen, der Funktionalität, dem Produktmarketing oder auch den Kosten. Ein Beispiel für den Zielkonflikt Recyclingfähigkeit und Funktionalität für eine Flasche mit Fensterreiniger ist die unterschiedliche Darreichungsform als Sprühpistolenflasche (schwieriger zu recyceln) im Vergleich zur Spritzflasche (besser zu recyceln). Es gibt viele Ansätze, sich dem Thema Recyclingfähigkeit zu nähern und Kriterien für konkrete Verpackungen aufzustellen. GVM hat im Rahmen einer Studie vom November 2016 die Kriterien der Recyclingfähigkeit nach Bezugspunkten und Prozessebenen systematisiert.

Kriterium	Sammlung	Sortierung	Verwertung	Bezugspunkt
Fehleinwürfe	X	X		Endverbraucher
Fehltrennung	X	X		
Restentleerbarkeit	X	X	X	
Materialkombination		X	X	Material
Barriere		X	X	
Additive und Füllstoffe		X	X	
Nebenbestandteile			X	Nebenbestandteile
Kleinteile		X		
Größe von Etiketten / Sleeves		X		
Farbe		X	X	Sonstiges
Druckfarben / -verfahren			X	
Klebstoff			X	

Quelle: GVM 2016

Bild 4 zeigt Kriterien zur Definition recyclingfähiger Kunststoffverpackungen

Generell kann eingeschätzt werden, dass blasgeformte Verpackungen aus Polyolefinen gut sortier- und recyclingfähig sind. Probleme beim Recycling können dann auftreten, wenn die schwarze Farbe die Aussortierung durch NIR verhindert, Barriere und Additive, Etiketten oder Sleeves oder auch bestimmte, nicht wasserlösliche Klebstoffe das Recycling erschweren. Bereits seit vielen Jahren gibt es für PET-Flaschen eine Ampel zur Recyclingfähigkeit (rot-gelb-grün), erarbeitet von der European PET Bottle Platform EPBP, die ganz wesentlich dazu beigetragen hat, dass PET-Flaschen europaweit überwiegend gut recyclingfähig sind. Nach einem analogen Schema hat PRE Plastic Recycling Europe Ampeln entwickelt für HDPE- und PP-Flaschen, aber auch für bestimmte Verpackungsfolien.



HDPE Bottles – 23/04/2014

	YES Full compatibility – materials that passed the testing protocols with no negative impact OR materials that have not been tested (yet), but are known to be compatible in PET recycling	CONDITIONAL Limited compatibility – materials that passed the testing protocols if certain conditions are met OR materials that have not been tested (yet), but pose a low risk of interfering with PET recycling	NO Low compatibility – materials that failed the testing protocols OR materials that have not been tested (yet), but pose a high risk of interfering with PET recycling
Container	HDPE		
Colours	Colourless or light colours	Dark colours, black inner layer	Black
Barrier			EVOH, PA, PVDC
Additives			Additives making the material density > 1 g/cm ³
Closure Systems	PE+HD, PE-LD, PP		material with density > 1 g/cm ³
Linings, Seals and	PE+HD, PE-LD, PE+EVA, PP		material with density > 1 g/cm ³ (e.g. PS, PVC, EVA with
Valves			aluminium)
Labels	PE+HD, PE-LD, PP	Paper, PET	material with density > 1 g/cm ³
Sleeves	PE	PE, PET and PET-G, PE stretch sleeves Shrink sleeves with perforations and revealing less than 30% of the HDPE bottle Aluminium than can be peeled out	Metallised materials material with density > 1 g/cm ³ (e.g. PVC, PS, PET-G and other materials) Metalised materials; heavily inked sleeves
Tamper Evidence	PE, PP, OPP, EPS (all with density < 1 g/cm ³)		Metal, foiled paper
Wrap	water soluble (less than 80°C)		pressure-sensitive labels; self-adhesive labels
Adhesives			inks that bleed; toxic or hazardous inks
Inks	non-toxic; follow EUPIA Guidelines		any other direct printing
Direct Printing	laser marked	production or expiry date	materials with density > 1 g/cm ³ (e.g. metal, RFID tags); other plastics materials with density > 1 g/cm ³
Other	base cap, handles or other components which are separated by grinding and have a density < 1 g/cm ³ ; PET		
Components			

Bild 5 zeigt eine solche Ampel für HDPE-Flaschen.

Solche Ampeln stellen ein wichtiges Tool dar, um auf breiter Ebene für masserelevante Verpackungsströme die Recyclingfähigkeit zu verbessern. Selbstverständlich muss für jede einzelne Verpackung das Thema differenzierter angegangen werden, auch im Hinblick auf die Verpackungseigenschaften beim Abfüll-/ Abpackprozess, in der Logistikkette, beim Handel sowie dann in der Nutzungsphase beim Endverbraucher. Insofern ist der Ansatz im deutschen Verpackungsgesetz, mit finanziellen Anreizen die Recyclingfähigkeit zu verbessern, auch geeignet, das Problembewusstsein in der Verpackungskette zu diesem Thema zu schärfen und gemeinsam nach Lösungen zu suchen.

IT-Sicherheit im Umfeld Industrie 4.0

IT-Sicherheitsbedrohungen risikogerecht begegnen

Prof. Dr. rer. nat. **D. Loomans, M. Matz**, Loomans & Matz AG, Mainz

Kurzfassung

Werksleiter sehen sich mit der IT-Integration der Produktions- und Bürokommunikation konfrontiert. Neben Vorteilen für Beschaffung, Steuerung, Wartung und Prozessintegration wachsen damit auch die Sicherheitsprobleme im Produktionsumfeld. Und Gegenmaßnahmen, die im Büroumfeld funktionieren, können für ein Produktionsnetz desaströse Konsequenzen haben.[1]

1. Ausgangssituation

Mit der Integration der Produktions- und Büronetze über gemeinsame IP-Netzwerke werden auch die Komponenten im Produktionsumfeld von neuen IT-Risiken betroffen. Schadsoftware kann etwa über infizierte Steuerrechner oder USB-Sticks ins Produktionsnetz gelangen. Auch wenn die Schadfunktion nicht für ein Produktionssystem geschrieben wurde, kann sie doch als 'Nebeneffekt' dessen Funktionalität einschränken oder dazu führen, dass Komponenten im Netz ausfallen. Hacker können sich jedoch auch gezielt über das Internet Zugriff auf Steuer- und Produktionsmaschinen verschaffen und so Geräte umkonfigurieren oder Schaden anrichten. So haben IT-Angreifer erst kürzlich die Kamerasysteme eines Tunnels in Israel angegriffen und dadurch dafür gesorgt, dass der Verkehr für 20 Minuten gesperrt werden musste. Produktionsleiter müssen zudem zunehmend damit rechnen, dass das organisierte Verbrechen hier ein vielversprechendes 'Geschäftsmodell' für sich entdeckt. Denkbar sind Angriffe, die Steueranlagen an prozessempfindlichen Stellen sperren und erst nach Zahlung einer 'Sicherheitsgebühr' wieder freischalten.

Auch Angriffe von gut ausgestatteten Geheimdiensten, wie im Fall Stuxnet, könnten in Zukunft häufiger auftreten. Selbst wenn das eigene Netz dabei nicht das Ziel eines solchen Angriffs ist, muss die Produktionsleitung mit Kollateralschäden rechnen. So fanden sich Stuxnetkopien auch auf Simatic S7-Systemen 'unbeteiligter' Unternehmen - zum Beispiel aus der Automobilindustrie. Gepaart mit der Tatsache, dass viele Unternehmensführungen die Gefahren, die der IT durch die weltweite Vernetzung drohen, bisher fast fahrlässig unterschätzen, lässt hier ein ernst zu nehmendes Bedrohungspotenzial vermuten. Es scheint

deshalb naheliegend und effizient, bei der Betrachtung der IT-Sicherheit im Automatisierungs- und Produktionsumfeld einfache Verfahren und Maßnahmen der IT-Sicherheit für klassische Büronetze zu verwenden. Zum einen können viele Unternehmen in diesem Umfeld auf bestehende Konzepte zugreifen, und zum anderen finden sich auf dem Markt eine Vielzahl an Produkten, die helfen können, IP-basierte Netze sicherer zu machen: Firewall, Intrusion Detection/Prevention, Zwei-Faktoren-Authentisierung und Virenschutzlösungen sind dabei nur einige der gängigen Beispiele.



Bild 1: Die unterschiedlichen Sichtweisen auf Sicherheitsziele (aus [2])

2. Produktions- und Büronetze sind nicht vergleichbar

Jedoch ist bei der Anwendung von IT-Sicherheitsvorgaben aus dem Büroumfeld in der Werkhalle Vorsicht angesagt. Die Konzepte etablierter Sicherheitsmaßnahmen stehen oft diametral im Gegensatz zu den Anforderungen des Produktionsumfeldes. Denn die IT-Sicherheit wird durch die Ziele Vertraulichkeit, Integrität und Verfügbarkeit gekennzeichnet - im englischen Sprachraum als Dreiklang aus 'Confidentiality', 'Integrity' und 'Availability' häufig mit dem Kürzel 'CIA' bezeichnet. Und während in den meisten Bürokommunikationsnetzen die Vertraulichkeit das größte Gewicht noch vor Integrität und Verfügbarkeit zugewiesen erhält, steht im Produktionsumfeld stattdessen die Verfügbarkeit, gefolgt von Integrität und Vertraulichkeit im Fokus. Wird diese 'AIC'-Herangehensweise vernachlässigt, kann dies in der Praxis gravierende Auswirkungen zeigen: IT-Sicherheitsprodukte werden seit Jahren für das Büroumfeld entwickelt und optimiert. Sie garantieren mehr oder weniger erfolgreich den

Vertraulichkeitsschutz der Daten im Netz. Dabei werden oft Verfügbarkeitskompromisse in Kauf genommen, da sich beide Ziele nur schwer miteinander vereinbaren lassen. Zum Schutz der Vertraulichkeit wird zum Beispiel akzeptiert, dass der betroffene Dienst für eine bestimmte Zeit nicht mehr angesteuert werden kann. Dies bedeutet aber im Produktionsumfeld oft den größeren Schaden. Zur Absicherung des Fertigungsumfelds kann also nicht einfach der Maßnahmenkatalog der IT-Sicherheit aus dem Büroumfeld genutzt werden.

3. Risikobasierter Ansatz für die IT-Sicherheit

Werks- und Produktionsleitern kann hier ein Ansatz für das Sicherheitsmanagement weiterhelfen, wie er sich im aktuellen Entwurf des 'National Institute of Standards and Technology' (NIST) zur Cybersicherheit in kritischen Infrastrukturen wiederfindet. Mit diesem lassen sich spezifische Problemstellungen im Fertigungsumfeld erkennen und bewerten. Gleichzeitig können die bereits etablierten IT-Sicherheitsmaßnahmen des Unternehmens bedarfsgerecht weiterverwendet werden. Prozesseigner ist dabei der Produktionsleiter. Er sollte mit der Identifikation der Risiken beginnen und sich danach auf diejenigen konzentrieren, welche ein hohes Schadenspotenzial bezogen auf die IT-Sicherheit aufweisen. Für diese Bereiche lassen sich im Anschluss die Bedrohungen und Schwachstellen unvoreingenommen analysieren und dokumentieren. Hierbei sollten auch die IT-Sicherheitsexperten aus dem Bürokommunikationsumfeld einbezogen werden. Die Führung entsprechender Projekte sollte sich der Produktionsleiter aber nicht 'aus der Hand nehmen' lassen.



Bild 2: Schadsoftware und Hacker bis hin zum organisierten Verbrechen bedrohen sogar ganze Produktionsstätten. So sehr es bei der Konzeption von Gegenmaßnahmen darauf ankommt, dass Produktionsleiter mit IT-Sicherheitsfachkräften zusammenarbeiten, ist es jedoch wichtig, dass sie dabei nicht blind auf 'bewährte' Sicherheitsmaßnahmen vertrauen. Vielmehr sollte der Produktionsleiter als Prozesseigner das Risiko für Anlagenbetrieb und -verfügbarkeit durch IT-Bedrohungen bewerten.

4. Risikosituation als Grundlage für Schutzmaßnahmen

Auf der Basis dieser Analyse können dann Schutzmaßnahmen definiert und verschiedene Kontrolloptionen gegeneinander abgewogen werden. Ausschlaggebend bleibt, dass die gewählten Maßnahmen - egal ob organisatorisch oder technischer Art - auch wirklich die Risiken für das Produktionsnetz minimieren und nicht, inwieweit sie dem bisherigen IT-Sicherheitsregelwerk entsprechen. Unternehmen werden dabei immer wieder feststellen, dass sich Konflikte mit der bestehenden IT-Sicherheitsarchitektur ergeben - etwa im Hinblick auf zeitnahe Einspielen von Sicherheitspatches. Diese Konflikte sollten mit Blick auf die Risiken gelöst und als ein Zeichen für die Ernsthaftigkeit des Vorgehens angesehen werden. Mit der Festlegung der Maßnahmen sollte der Prozess aber auf keinen Fall enden. Da oft die Verfügbarkeit im Vordergrund steht, ist das zeitnahe Erkennen von Sicherheitsvorfällen essenziell.

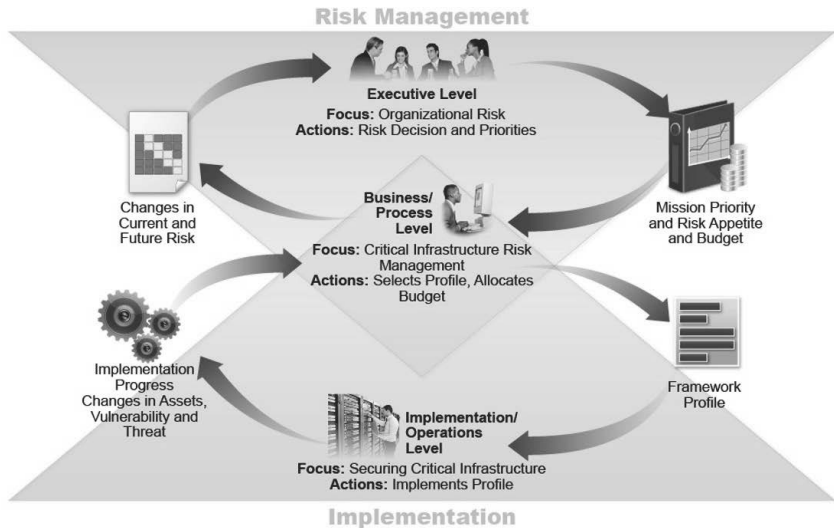


Bild 3: Die Zusammenarbeit zwischen Unternehmensführung und Produktionsbetrieb über ein gemeinsames Risikomanagement [3]

5. Erkennen, Behandeln, Wiederherstellen

In der Praxis erweist es sich dabei als sinnvoll, einen produktionsseitigen IT-Sicherheitskoordinator einzusetzen, entsprechende Meldewege zu etablieren und die Kommunikation im Ernstfall zu üben. Abgerundet wird dann das Vorgehen durch Überlegungen, wie ein durch einen Vorfall zum Erliegen gekommener Produktionsprozess zeitgerecht wiederhergestellt werden kann, ohne die Sicherheit weiter zu gefährden. Hier ist eine Einbindung in das Business-Continuity-Konzept des Unternehmens sinnvoll und meist kosteneffizienter als ein eigenes auf die Produktion beschränktes Vorgehen. So können Cybersicherheitsvorfälle gemeinsam mit dem gesamten Unternehmen geübt und eine schnelle Rückkehr zum Normalbetrieb nach Vorfällen gewährleistet werden.

High Output Blowmolding

Technologien im Blasformen für hohe Ausstossleistungen

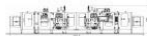
Dipl.-Ing. A. Kandt, Bekum GmbH, Berlin

Kurzfassung

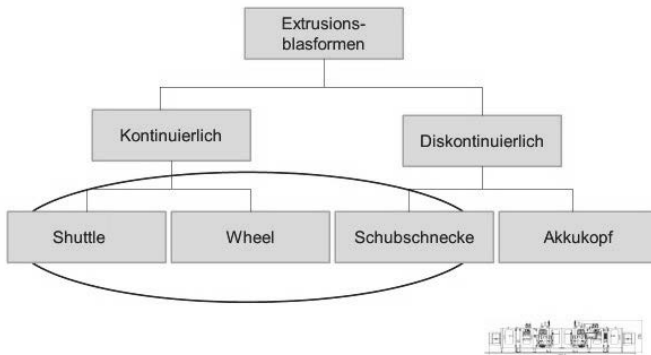
Es werden unterschiedliche Technologien im Blasformen für hohe Ausstoss Leistungen gegenübergestellt. Vor- und Nachteile sowie Randbedingungen für die einzelnen Verfahren werden skizziert und bewertet. Anwendungsbeispiele werden herangezogen.

Agenda

1. Langhub Maschinen
2. Tandem Blow
3. MPL Technologie
4. Schubschnecken
5. Räder
6. Zusammenfassung



Agenda



“High Output Solutions”

1. Langhub Maschinen



Definition

- Langhub bezeichnet ursprünglich eine Einstationenmaschine mit einem Fahrhub von > 1000 mm
- Heute sind Langhubmaschinen auch als Doppelstationenmaschinen im Einsatz
- Erfinder: Alpha zu Beginn der 90- iger Jahre
- In der Regel großes Verhältnis von Formenbreite- zu Formenlänge
- Spezielle technische Ansprüche an die Blasmaschine:
 - Präzision des Schliesssystems
 - Präzision der Blaswerkzeuge
 - Kopftechnologie



Die klassische Langhub- m/c

LONG STROKE MULTI-CAVITY PROGRAM



Bekum 907D
12 x 100mm Produktion

THE COMPLETE RANGE:
850 TO 1380 MM MOLD WIDTHS

OUTSTANDING FEATURES

- Single and Double Injection Machines
- Fully supported Automatic Change-over system
- Building vertical platforms
- Coloured units with clear acrylic hatches
- In-Machine De-bubbling
- Controlled bottle discharge to case press
- Up to 14 positions
- In-Ex and Co-Ex compatible
- Toolless flow
- Hot compatible
- Up to 7.5 million bottles per year output
- Bekum Worldwide Service and Support



Bekum 907D

Bekum Langhubprogramm

LONG STROKE MULTI-CAVITY PROGRAM



LONG STROKE MACHINE TECHNICAL DATA

The Complete Range of Double Injection High Output Blow Molding Machines

MACHINE	HYDRON 407D	BAM ROAD	HYDRON 407D	BAM 907D
Max. Mold Width (mm)	850	850	1000	1380
Max. Mold Length (mm)	470	470	530	530
Mold Stack (mm)	2 x 130	2 x 130	2 x 150	2 x 180
Mold Depth (mm)	350	410	380	530
Clamp Force (kN)	190	270	240	400
Clamp Force (t x 9.8)	19.8	28.2	24.9	40.8
Cycle Time (sec.)	0.8	4.0	4.5	3.0

STANDARD CONTAINER DISTANCES (mm)				
2 Positions		400		
3 Positions		290	200	430
4 Positions	200	200	200	300
5 Positions	150	150	190	350
6 Positions	125	125	150	300
7 Positions	110	110	130	190
8 Positions	100	100	110	140
9 Positions	85	85	100	140
10 Positions	80	80	90	125
12 Positions	65	65	80	100
14 Positions			65	85

BEKUM AMERICA CORPORATION
P.O. Box 1000, Oak Ridge, Tennessee
www.bekumusa.com

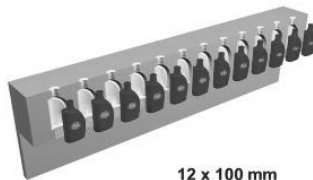
60-00-004

BM-907D als Flaschen-Maschine:

Bis zu 75 Millionen Flaschen p.a.

Formenbreite: 1380 mm
Formenlänge: 500 mm
Öffnungsmass: 500 mm
Schliesskraft: 400 kN
Stichabstände:

4 x 300 mm
5 x 250 mm
6 x 200 mm
7 x 180 mm
8 x 160 mm
10 x 125 mm
12 x 100 mm
14 x 85 mm



12 x 100 mm



“High Output Solutions”

2. Tandem Blow



Tandem Blow

Tandem Blow

Erhöht die Ausstoßleistung um 100%



48 Kartons
120 ltr mit Inhalt
Tandem Blow

Über 100 Millionen Behälter pro Jahr !

Besondere Kennzeichen

- Ausst. eines Extrudierstrahls (zwei Pressen hintereinander, d.h. 100% Produktivsteigerung)
- Weichenverstellbare Parisonen mit bis zu 18.000 Parisonen/Minute
- Niedrige Investitionskosten pro Einheit
- Niedrige Energiekosten pro Flasche
- Reproduzierbare Flaschenqualität
- Geringer Raumbedarf auch bei Mehrf. Maschinen
- Mehrfache Beschleunigung (1,5/2)
- Stabile Material- und Formen-Schulung
- Für Mono- und Mehrschichten-Flaschen



BESKUM Maschinenbau GmbH
Tel. +49 90 7400 0, info@beskum.de, www.beskum.de

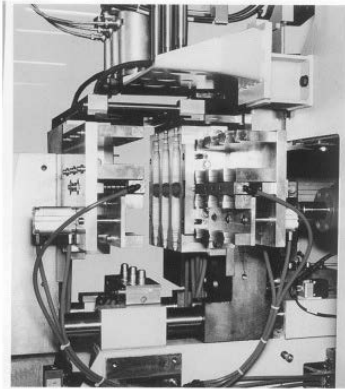
Mono oder Multilayer;

**Tandem Blow ist Bekums
erprobte Technologie für die
Food, Getränke und Dairy
Industrie!**

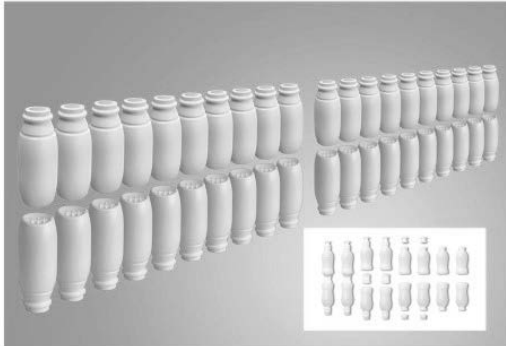


Tandem Blow

- Flaschen werden Boden/ Boden geblasen
- Blasen mit verlorenem Blasraum
- Nachgeschaltete Automation für gerichtete Übergabe
- Eingeschränkte Formenlänge
- Jeder Kopf erzeugt bei einer Doppelmaschine 4 Flaschen
- 100% Produktionssteigerung

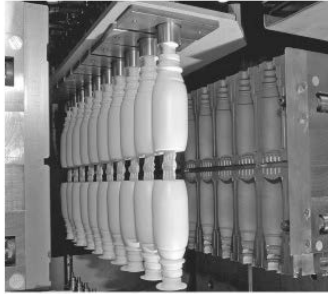


Tandem Blow



Tandem Blow

**10 Schläuche / 20 Formennester pro Form
= 40 Kavitäten (EBLOW 607D)**



> 100 Mio. Flaschen p.a.!



“High Output Solutions”

3. MPL (Multi-Parting Line)



MPL

MULTI-PARTING LINE (MPL)
A TECHNOLOGY ALLIANCE

Bekum's MPL Technologie

MULTI-PARTING LINE (MPL)
A TECHNOLOGY ALLIANCE

MPL TECHNICAL DATA

MACHINE	HL 121	HL 155	HYBLOW 4070 BELOW 4070	HYBLOW 4070 BELOW 4070	BA 6040
Max. Shuttle height (mm)	205	205	240	295	240
Max. Shuttle depth (mm)	65	85	75	100	100

STANDARD CENTERLINE DISTANCES (mm)*

	120	180	180	300	-
9 Cavities	-	-	-	-	-
12 Cavities	85	125	150	200	-
16 Cavities	-	95	100	150	180
20 Cavities	-	75	85	110	-
24 Cavities	-	-	75	100	135
32 Cavities	-	-	-	75	85
40 Cavities	-	-	-	-	75

* Minimum 100% extrusion head Center Line Distance (CLD)
 Above Layer = 75 mm CLD
 2 Layer = 85 mm CLD
 3 Layer = 95 mm CLD

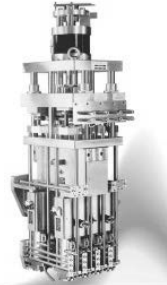
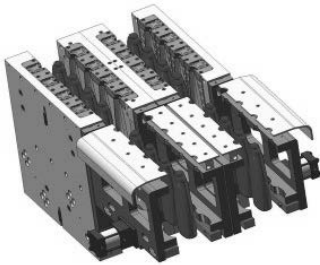
MPL

Zwei Formtrennebenen Doppelter Ausstoss!



MPL

Spezielle, patentierte Formen und Kopftechnologie



“High Output Solutions”

4. Schubschnecken (Recip) Technologie



“High Output Solutions”

5. Räder



Vertikalextruder für Blasformanwendungen

Hochleistungsextruder bieten neue Einsatzmöglichkeiten

Vertical extruders for blowmolding applications

High performance extruders offer new applications

Dipl.-Ing. **M. Balzer**, GIFA Plastifiziertechne Wurtscheid GmbH, Hennef

Kurzfassung

Vertikalextruder bauen kompakt und eignen sich deshalb gut für neue Extrusionsblasanlagen, bei denen auf geringe Abmessungen Wert gelegt wird. Auf bereits existierenden Anlagen können sie leicht nachgerüstet werden. In beiden Fällen bieten Vertikalextruder exzellente Möglichkeiten, die Spülzeiten beim Farbwechsel zu verkürzen.

Abstract

Vertical extruders are very compact and suitable for new extrusion blow molding machines which are optimized for low space consumption. Also for existing machines it is easy to adapt vertical extruders additionally. In both cases vertical extruders offer excellent possibilities to shorten purging time for color change.

1. Anwendungsbereiche

Vertikalextruder sind in der Extrusion, z. B. Kabelindustrie, durchaus üblich. Sehr oft werden sie dort als fahrbares Beistellaggregat verwendet. Im Blasformen ist die Anwendung als Hauptextruder begrenzt auf kleinere Anlagen, wenn kompakte Bauweise und geringe Standfläche gefordert sind. Standardstatus haben Vertikalextruder für Sichtstreifen bei kontinuierlicher Extrusion, gelegentlich auch bei Mehrschichtextrusion, überwiegend im Verpackungsbereich (Zwei- bzw. Dreischicht).

2. Aufbau und Funktion

Prinzipiell ist der Aufbau vergleichbar mit Standardextrudern, wie sie beim Blasformen z.B. für Polyolefine eingesetzt werden. Als Motoren werden bevorzugt schlank ausgeführte Servomotoren als Direktantrieb eingesetzt, denen ein Getriebe zur Drehzahl Anpassung vorgelagert wird. Ein kombiniertes Axial- und Radiallager übernimmt die seitliche Führung und fängt den Rückdruck der Schnecke ab. Vom Trichter durch Absperrschieber und Zulauf

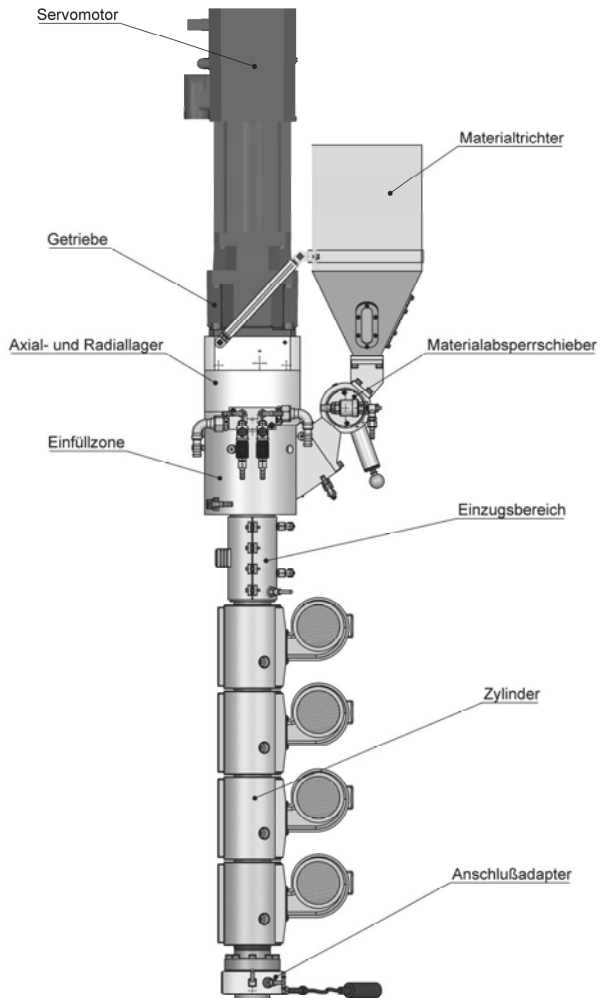


Bild 1: Aufbau eines modernen Hochleistungs-Vertikalextruders

gelangt das Material in die Einfüllzone. Im Einzugsbereich findet auf der Schnecke die Verdichtung statt mit anschließender Aufschmelzung.

2.1 Aufbau: Besondere Kriterien

Vertikalextruder sind aufgrund der senkrechten Lage vibrationsanfällig. Die Extruderlänge ist dadurch begrenzt, eine Abstützung ist zwingend erforderlich. Ein weiterer Aspekt ist die innere Wärmeleitung sowie die äußere Konvektionswärme, die entlang des Zylinders zur Einfüllzone aufsteigt. Neben der Kühlung des Einzugsbereiches sollte deshalb zusätzlich auch die Einfüllzone gekühlt werden. Dies sichert den Materialfluss in der Einzugszone und schützt Lagerung und Antrieb vor zu starker Erwärmung. Für eine gute Befüllung der Einzugszone hat sich eine schräge Materialzufuhr unter einem Winkel von mindestens 45° bewährt. Wegen des schrägen Einlaufes sollte dieser in axialer Richtung etwa 1,5 bis 2,2D lang sein. Vertikalextruder müssen kompakt und leicht sein, es werden kleine Schnecken-durchmesser von ca. 18 bis 50 mm bevorzugt.

2.2 Funktion: Besondere Kriterien

Der vertikale Materialfluss begünstigt die Selbstreinigung der Einfüllzone. Die schlanke Bauform ermöglicht den direkten Anbau am Extrusionskopf, optimal für schnelles Spülverhalten und kurze Materialverweilzeiten. Die kompakte Bauform begrenzt die Maximaldurchsätze. Mit aktuellen, neuen, im Einzugsbereich genuteten Hochleistungsextrudern werden aber über 50 kg/h HDPE bzw. UHMWPE-Pulver-Mahlgut-Mischung erreicht. Dabei bleibt die Durchsatzkennlinie über den gesamten Drehzahlbereich bis 100 U/min und im gesamten getesteten Gegendruckbereich bis 300 bar konstant /1,2/. Außerdem besteht die Möglichkeit einen dynamischen Mischer vom Typ CTM (Cavity Transfer Mixer) zu integrieren, der optimale Materialhomogenität, auch bei hoher spezifischer Ausstoßleistung, sicherstellt /3/. Dies beschleunigt auch das Spülverhalten des nachgeschalteten Extrusionskopfes. Die eh schon kurzen Einschwingzeiten beim Anfahren des kompakten Vertikalextruders können durch einen temperierten Einzugsbereich weiter verkürzt werden.

3. Vergleich mit Horizontalextruder

Horizontale und vertikale Bauweise sind sehr ähnlich, da die gleichen Materialien in beiden Extrudertypen verarbeitet werden müssen, hinsichtlich des Aufbaues gibt es aber doch Unterschiede im Detail. Beim Vertikalextruder werden wegen Gewichts- und Bauraumbeschränkung Einfüllzone und Zylinderrohr funktional in einem Teil zusammengefasst. Diese Einschränkungen bestehen beim horizontalen Extruder nicht, deswegen wird meist ein mo-

dularer Aufbau aus Einfüllzonengehäuse, Nutbuchseneinsatz und angeflanschem Zylinderrohr realisiert. Der Vertikalextruder muss an der gesamten Einfüllzone gekühlt werden, beim Horizontalextruder genügt eine Kühlung vom Anschlussbereich des Zylinderrohres bis zur Vorderkante der Einfüllöffnung. Die Einzugsöffnung beim Vertikalextruder baut größer wegen des schrägen Materialeinlaufes, beim Horizontalextruder genügt eine kleinere Öffnung senkrecht zur Extrusionsrichtung. Der Schneckenaufbau ist nahezu gleich, nötigenfalls muss der Einzugsbereich an die längere Einfüllöffnung des Vertikalextruders angepasst werden. Sofern der Einsatz von Keilriemenantrieb gewünscht ist, gestaltet sich dies beim Horizontalextruder sehr einfach. Beim Vertikalextruder ist diese Variante nicht vorgesehen. Die Anbindung des Extruders an den Extrusionskopf ist beim Vertikalextruder sehr kurz und direkt, bei Horizontalextrudern, insbesondere bei Coextrusionsköpfen, gestaltet sich die Anbindung oft komplizierter und länger. Insofern hat der Vertikalextruder meist Vorteile durch kürze Materialverweilzeiten und schnelleres Abreinigungsverhalten im Verbindungsbereich zum Extrusionskopf. Vertikalextruder sind auf nahezu jeder Blasformanlage nachrüstbar, allerdings meist nur in Verbindung mit einem geänderten oder neuen Extrusionskopf. Eine Erweiterung einer Blasformanlage um weitere Horizontalextruder vergrößert den Aufwand des Umbaus aber noch erheblicher, da zusätzlich die Extruderbühne und möglicherweise weitere tragende Komponenten angepasst werden müssen.

3.1 Kombination von Horizontal- und Vertikalextruder

Neue Anlagen können durch eine geschickt gewählte Kombination von Horizontal- und Vertikalextruder deutlich kompakter bauen als Anlagen, die nur auf Horizontalextruder zurückgreifen. Wie kompakt sich Vertikalextruder einfügen, zeigt in Bild 2 beispielhaft ein Dreischichtextrusionskopf, der mit zwei baugleichen Vertikalhochleistungsextrudern ausgerüstet ist. Die Kombination beider Extrudertypen bietet aber auch die Möglichkeit, den Gesamtdurchsatz und damit die Gesamtleistung bereits existierender Anlagen durch Ergänzung mit Vertikalextrudern zu steigern, wenn die restlichen Randbedingungen dies zulassen, insbesondere, wenn die gewünschte Steigerung der Leistung nicht durch Anpassung der Einfüllzonen- und Schneckengeometrie der vorhandenen Extruder erreicht werden kann. Bild 3 stellt die einfachsten Kombinationsmöglichkeiten schematisch dar – kontinuierliche Monolayer-, Zweischicht- und Dreischichtextrusion. Anhand eines Rechenbeispiels, bei dem ein Horizontalextruder mit einem angenommenen HDPE-Nominaldurchsatz von 180kg/h mit einem bzw. zwei Hochleistungsvertikalextrudern 38/29HD kombiniert wird, erkennt man die Möglichkeiten, die Vertikalextruder eröffnen.

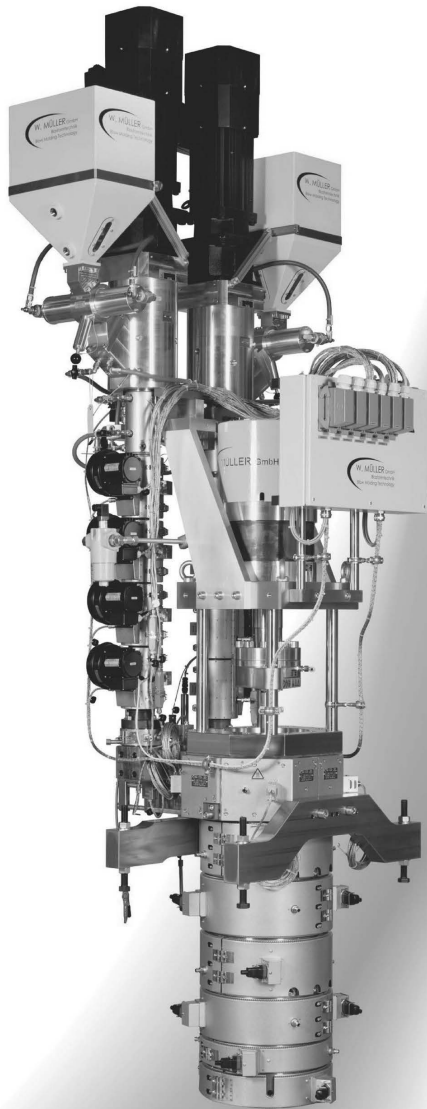
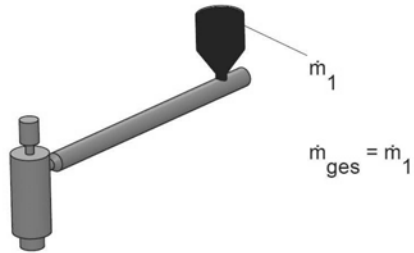
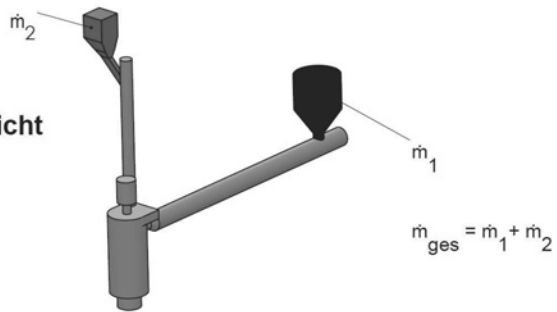


Bild 2: Dreischichtkopf S1/250 P-PE ReCo 3 mit 2 Vertikalthochleistungsextrudern 38/29D

Monolayer



Zweischicht



Dreischicht

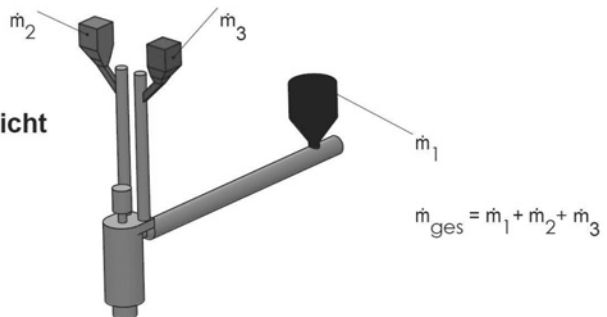


Bild 3: Einfache Kombinationsmöglichkeiten von Vertikalextrudern mit einem Horizontalextruder

Tabelle 1: Vergleich Produktions- und Reinigungsprozess mit Vertikalextrudern

		Produktion					
		Durchsatz je Extruder		Neuware	Regenerat	Neuware	Regenerat
		[kg/h]	%	%	%	[kg/h]	[kg/h]
Monolayer							
	Extruder 1	180	100	65	35	117	63
	Gesamt	180	100	65	35	117	63
Zweischicht							
Innen	Extruder 1	180	85	50	35	106	74
Außen	Extruder 2	32	15	15	0	32	0
	Gesamt	212	100	65	35	138	74
Dreischicht							
Mitte	Extruder 1	180	67	31	35	85	95
Außen	Extruder 2	40	15	15	0	40	0
Innen	Extruder 3	50	19	19	0	50	0
	Gesamt	270	100	65	35	175	95
		Farbwechsel/Spülen					
		Durchsatz je Extruder		Neuware	Regenerat	Neuware	Regenerat
		[kg/h]	%	%	%	[kg/h]	[kg/h]
Monolayer							
	Extruder 1	180	100	100	0	180	0
	Gesamt	180	100	100	0	180	0
Zweischicht							
Innen	Extruder 1	157	74	74	0	157	0
Außen (*)	Extruder 2	55	26	26	0	55	0
	Gesamt	212	100	100	0	212	0
Dreischicht							
Mitte	Extruder 1	180	67	67	0	180	0
Außen (*)	Extruder 2	55	20	20	0	40	0
Innen	Extruder 3	35	13	13	0	50	0
	Gesamt	270	100	100	0	270	0

(*) : begrenzt durch Maximalleistung des Vertikalextruders

Man kann an dem Beispiel leicht erkennen, dass der Hochleistungsvertikalextruder, bei Ausnutzung der maximalen Ausstoßleistung, in der für den Farbwechsel maßgeblichen, äußeren Schicht den Durchsatz und damit auch die Abreinigungsgeschwindigkeit um ca. 35 bis 70% erhöht. Damit wird die Farbwechselzeit entsprechend auf ca. 75 bis 60% im Vergleich zur Monolayeranwendung abgesenkt – vorausgesetzt Monolayerextrusionskopf und Mehrschichtextrusionskopf verhalten sich in etwa gleich bei Farbwechsel unter Produktionsgeschwindigkeit. Mit der Verkürzung der Spülzeit geht eine entsprechende Materialeinsparung während des Farbwechsels einher. Bei diesen Betrachtungen ist noch nicht berücksichtigt, dass auf das obige Rechenbeispiel bezogen, der kompaktere Vertikalextruder im Vergleich zum Horizontalextruder einen um etwa 1,5 bis 2-fach höheren volumenspezifischen Durchsatz hat und deshalb selbst auch schneller sauber wird.

4. Literaturnachweis

- [1] ML, Technikum Extrudertest BA-Nr. 127798, Extruder 38/29HD, Hostalen ACP5531B - Neuware, W.Müller GmbH Troisdorf, 2016
- [2] ML, Technikum Extrudertest BA-Nr. 127798, Extruder 38/29HD, Lupolen 5261ZS (Pulver) + Mahlgut, W.Müller GmbH Troisdorf, 2016
- [3] Eppe, S.; Grünschloss, E.; Bonten, C.: Mischergebnisse im Einschneckenextruder. Kunststoffe 4/2012 S. 58-61

Der bisher effizienteste Antrieb für die Extruder-Branche

Dipl.-Ing. (FH) **G. Pankratz**, Pikatron GmbH, Usingen

Kurzfassung

Antriebslösungen für Extruder, die sich aus Elektromotor und Getriebe zusammensetzen, sind weitläufig bekannt. Auch direktangetriebene Extruder (ohne Getriebe- oder Riemenuntersetzung) kommen zum Einsatz. In dieser Ausarbeitung geht es darum, ein neues, patentiertes Torque-Motor-Konzept vorzustellen, das sich vom herkömmlichen, hochpoligen, energetisch unwirtschaftlichen Synchron-Torquemotor weit abhebt. Es ist deshalb gerade für langsam drehende Antriebe, wie sie bei Extrudern erforderlich sind, sehr gut geeignet. Dieses bereits vielfach bewährte Direktantriebskonzept mit dem Cool-Torquemotor bietet die bisher beste Möglichkeit, den gesetzlichen und betrieblichen Anforderungen in Bezug auf Energieverbrauch und Kostensenkung (Energiekosten, Wartungskosten) gerecht zu werden.

1. Motorprinzipien

Der elektrische Motor ist ein Energiewandler: aus elektrischer Energie entsteht mechanische (Rotations-)Energie. Dies gelingt durch Wechselwirkung zwischen statischen, meist permanentmagnetisch erregten und dynamischen, elektrisch erzeugten Magnetfeldern im feststehenden Stator und im drehbar gelagerten Anker (oder Rotor genannt). Die durch Abstoßung gleichnamiger Magnetpole gewonnene Rotationsenergie im Rotor wird entweder direkt oder über ein Getriebe und/oder Riemen zur Drehzahlانpassung auf die Extruderschnecke übertragen.

Zu diesem generellen Ergebnis führen eine Vielzahl von Lösungen mit elektrischen Antrieben, die auf den ersten Blick sehr ähnlich aussehen, sich in ihrer Funktionsweise jedoch grundlegend unterscheiden. Damit ergeben sich auch Unterschiede in den charakteristischen Eigenschaften.

Eine gut überlegte Auswahl unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten ist hier angebracht. Dazu seien zunächst kurz die folgenden Antriebssysteme, die in der Extrudertechnik verbreitet im Einsatz sind, vorgestellt. Da aus vielen Gründen die Gleichstromtechnik heute zunehmend von der Drehstromtechnik abgelöst wird, soll diese hier nicht mehr behandelt werden.

1.1 Asynchronmotor

Der Drehstrom-Asynchronmotor ist als Käfigläufermotor der Drehstrommotor mit dem einfachsten Aufbau (Bild 1). Seine Robustheit, die geringen Herstellkosten, die hohe Lebensdauer und der geringe Wartungsaufwand (keine Bürsten) sind einige seiner bestechenden Eigenschaften, weshalb er in vielen Industriebereichen eingesetzt wird. Er ist sehr Überlastfähig und besitzt bei Betrieb mit Frequenzumrichtern eine relativ hohe Leistungsausbeute durch den Betrieb über die Nenndrehzahl hinaus in dem sogenannten Feldschwäcbereich.

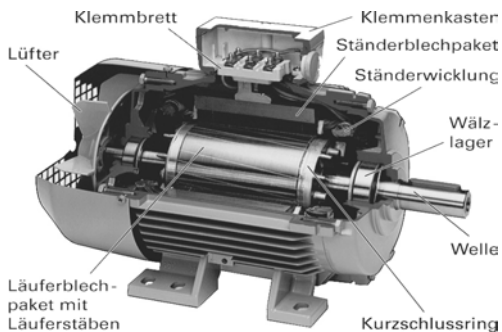


Bild 1: Aufbau eines Asynchronmotors (Käfigläufer) [2]

Zur Vermeidung von Wirbelströmen sind Stator (Ständer) und Rotor (Läufer) des Motors aus Blechen zusammengesetzt. In die Nuten des Stators ist eine symmetrische Drehstromwicklung eingebracht. Mittels des dreiphasigen Statorstroms wird ein umlaufendes Drehfeld erzeugt. Eine Kommutierung über verschleißbehaftete Bürsten, wie sie in der Gleichstromtechnik noch üblich waren, ist damit nicht mehr notwendig. Der ebenfalls genutzte Rotor trägt eine sogenannte Kurzschlusswicklung. Sie besteht aus massiven Aluminium- oder Kupferstreben, die stirnseitig durch sogenannte Kurzschlussringe aus dem gleichen Material verbunden sind. Das rotierende Magnetfeld des Stators induziert einen Strom in der Kurzschlusswicklung des Rotors, der wiederum ein Magnetfeld im Rotor hervorruft, das in Wechselwirkung mit dem Statorfeld ein Drehmoment erzeugt, das einen Ausgleich der Kräfte anstrebt. Mit der Annäherung an diesen Fall nimmt das Drehmoment ab. Bei diesem Motor folgt der Rotor also nicht synchron dem Statordrehfeld, was ihm den Namen Asynchronmotor einbringt. Es stellt sich ein belastungsabhängiger Schlupf ein, ohne den dieses Prinzip nicht funktioniert. Der Anspruch, Drehzahl und/oder Drehmoment konstant zu halten, erhöht die

Anforderung an eine gute Regelung, der sich in der Software niederschlägt. Erst durch den Einsatz der Vektorregelung ist das Drehmoment M bestimmt durch den Statorstrom I :

$$M \sim I$$

Die Drehzahl n ist von der Anzahl der Drehstromwicklungen, der Polpaarzahl p , abhängig und wird über die Frequenz f gesteuert. Durch mehrfache Anordnung des 3-phasigen Wicklungssystems und Reihenschaltung der entsprechenden Phasen entstehen Motoren mit mehr als einem magnetischen Polpaar. Mit der Verdopplung der Polpaarzahl halbiert sich die Drehfrequenz des Statorfeldes und damit reduziert sich auch die Drehzahl des Rotors, ohne dass sich die Frequenz des Stromes ändert. Aufgrund des Schlupfes s (in Prozent) ist die Drehzahl des Asynchronmotors im Lastfall immer kleiner als die Drehfrequenz:

$$n = (1 - s / 100) \times 60 \times f / p \quad (\text{Einheit 1/min})$$

Vorteile:

- Einfacher, kostengünstiger Aufbau
- Wartungsarm (keine Bürsten!)
- Läuft auch ohne Ansteuerung direkt am 3-phasigen Netz

Nachteile:

- Relativ hohe Verluste im Rotor
- Hohe Verluste im Teillastbereich
- Hohe Wärmeentwicklung, Kühlung erforderlich
- Hoher Regelungsaufwand
- Kein Haltemoment im Stillstand
- Bei größeren Leistungen ist eine Anfahrlilfe oder Umrichter erforderlich

1.2 Synchronmotor

Der Stator eines Synchronmotors hat prinzipiell den gleichen Aufbau wie der eines Asynchronmotors. Der Rotor unterscheidet sich durch die auf seinem Umfang dicht an dicht geklebten Permanentmagneten, die für eine dauerhafte und konstante Felderregung sorgen. Heute werden dazu meist Neodymium-Eisen-Bohr-Magnete verwendet, die inzwischen durch den extremen Preisverfall relativ günstig zu beschaffen sind (Bild 2).

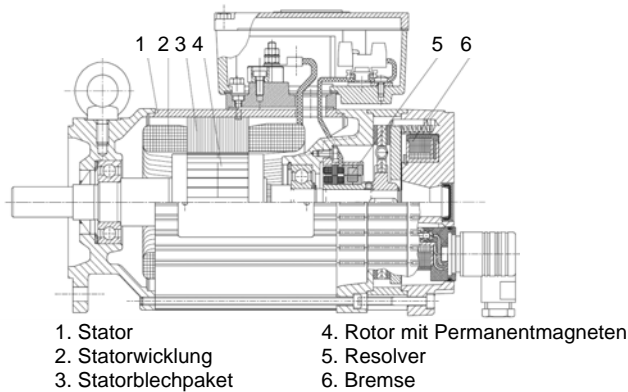


Bild 2: Teilschnittbild eines permanentenerregten Synchronmotors [3]

Die Erzeugung des Drehfeldes geschieht hier in ähnlicher Weise wie beim Asynchronmotor. Durch die Wechselwirkung zwischen drehendem Statorfeld und permanentem Rotorfeld entsteht ein Drehmoment mit dem Bestreben, den Rotor in den Bereich des stärksten magnetischen Feldes des Stators zu drehen. Um diesen Fall möglichst schnell und optimal zu erreichen, setzt man Gebersysteme (Resolver Pos. 5 in Bild 2) ein, die den Winkel des Rotors im Stator magnetfeld registrieren und über den Statorstrom dafür sorgen, dass diese Position gehalten wird. Wie der Name des Motors schon aussagt, folgt hier der Rotor der Drehfeldfrequenz synchron, also ohne Schlupf. Dabei ist das Drehmoment dem Statorstrom proportional. Rotor und Stator treten in eine konstante Winkelbeziehung, die sich unter Last im Bereich des Polradwinkels vergrößert, der durch die Größe der Permanentmagneten und die Anordnung der Spulen im Stator bestimmt ist. Die Strombegrenzung des Reglers bestimmt das maximale Drehmoment. Erreicht das Drehmoment diese Grenze, bleibt der Motor stehen, das heißt, er liefert volles Drehmoment im Stillstand. Die Drehzahl berechnet sich zu

$$n = 60 \times f / p \quad (\text{Einheit 1/min})$$

Tabelle 1: Drehzahlen die sich abhängig von der Polpaarzahl und einer Drehfeldfrequenz von 50 Hz ergeben

Polpaarzahl	1	2	3	4	5	6	7	8
n bei 50Hz	3000/min	1500/min	1000/min	750/min	600/min	500/min	429/min	375/min

Hinsichtlich der maximal möglichen Polpaarzahl sind durch die Baugröße Grenzen gesetzt. Vorteile:

- Keine Verluste bei der Felderregung durch stromlose Permanentenerregung
- Dadurch geringerer Kühlungsbedarf als bei Asynchronmotoren
- Kleinere Baugröße und geringeres Gewicht bei gleicher Leistung aufgrund des Wegfalls der Rotorwicklung
- Starre Kopplung zwischen Drehfeld und Drehzahl, sehr gute Regelbarkeit und Positionierung mit hoher Genauigkeit
- Wartung nur in Bezug auf die Lager notwendig
- Saubere Drehmomentregelung auch im Stillstand möglich

Nachteile:

- Aufwendigerer Aufbau als Asynchronmotor, dadurch teurer
- Nur begrenzter Feldschwächbereich
- Ansteuerung durch Umrichter erforderlich, ermöglicht aber exakte Regelung und Positionierung
- Wegen der Permanentmagnetenerregung entsteht eine kleine Drehmomentwelligkeit (Ripplemoment), die von einem guten Regler ausgeglichen werden kann
- Geringere Verluste im Teillastbereich als Asynchronmotor

1.3 Direktantrieb mit dem Synchron-Torquemotor

Eine innovative Antriebslösung stellt der Direktantrieb über einen Synchron-Torquemotor dar. Der Antrieb eines Extruders hat die prozessbedingte Anforderung einer niedrigen Drehzahl bei sehr hohem Drehmoment. Auf das Prinzip des oben beschriebenen Synchronmotors übertragen, bedeutet dies zunächst die Realisierung einer hohen Polpaarzahl zur Reduzierung der Drehzahl, was folglich eine kleinere Polteilung erfordert. Um Berührung der Pole zu vermeiden, muss der Durchmesser vergrößert werden. Jedoch führt eine kleinere Polteilung zu einer räumlichen Konzentration der Kupferverluste und damit zu einer höheren thermischen Belastung. Eine Anpassung des maximal zulässigen Stromes würde wieder ein geringeres Drehmoment nach sich ziehen, was sich kontraproduktiv auf den Einsatz als Extruderantrieb auswirkt. Soll aber die thermische Belastbarkeit beibehalten werden, muss entweder eine bessere Kühlung der Wicklung erfolgen oder der Umfang der Maschine weiter vergrößert werden. Damit entsteht ein hochpoliger Synchronmotor, der sogenannte Synchron-Torquemotor.

Wie beim Synchronmotor ist die Drehzahl umgekehrt proportional zur Polpaarzahl und das Drehmoment proportional zum Strom. Die Polpaarzahl liegt üblicherweise bei 20 bis weit über 100.

Der höhere Anschaffungspreis gegenüber einer vergleichbaren Synchronmotor-Getriebe-Kombination liegt in der Größe und dem Herstellungsaufwand begründet.

Aufgrund seiner Größe ist es gut möglich, ihn mit einer Hohlwelle und entsprechender Lagerung (Drucklager) auszustatten, was die direkte Aufnahme der Extruderschnecke und Zylinder ermöglicht.

Man findet ähnliche Vor- und Nachteile wie beim Synchronmotor. Darüber hinaus sind die folgenden zu nennen:

Vorteile:

- Hohlwelle möglich
- Spielfreier Antrieb (ohne Getriebe)
- Höhere Lebensdauer der Lager
- Hohe Leistungsdichte
- Wartungsarm, aufgrund der kleinen Drehzahl ist die Beanspruchung der Lager wesentlich geringer

Nachteile:

- Große Baugröße, daher auch hohe Wellenhöhe
- Hoher ohmscher Widerstand der Wicklungen, dadurch hohe Wärmeentwicklung, Kühlung erforderlich, meist Wasserkühlung
- Kleinste Baugröße 132
- Hoher Anschaffungspreis

1.4 Zusammenfassung der Eigenschaften der bisher beschriebenen Motortypen

Eine Gemeinsamkeit der ersten zwei beschriebenen Motortypen hinsichtlich der Verwendung für den Extruderantrieb ist auf den ersten Blick die Notwendigkeit eines Getriebes zur Anpassung der Drehzahl an die Schneckendrehzahl. Es gibt eine Vielzahl von Getriebelösungen, auf deren detaillierte Beschreibung verzichtet werden soll. Wichtig zu erwähnen ist, dass es bei einer wirtschaftlichen Betrachtung des Systems auf dessen Verluste ankommt. In diesem Zusammenhang sind Reibungsverluste an den Zahnflanken und sogenannte Planschverluste durch das Ein- und Austreten der Zähne im Getriebeöl zu nennen. Außerdem wirkt sich das Zahnflankenspiel in jeder Getriebestufe negativ auf die Regelstrecke aus (Schwingneigung). Der beschriebene Synchron-Torquemotor dagegen benötigt kein Getriebe, da er aufgrund seiner hochpoligen Statorwicklung für eine dem Extruderbetrieb angepasste Drehzahl ausgelegt werden kann.

Eine weitere Gemeinsamkeit ist die unerwünschte Wärmeproduktion der Motoren, die im Dauerbetrieb schon unter Nennbedingungen zum Schutz vor Defekten abgeführt werden muss. Dies wird mittels einer Fremdkühlung durch Luft oder Wasser realisiert, die wiederum wartungsbedürftige Pumpen und Wärmetauscher erfordert.

Die Eigenschaften der bisher beschriebenen Antriebsarten sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2: Übersicht der in Kapitel 1 beschriebenen Antriebstopen

Asynchronantrieb	Synchronantrieb	Synchron-Torqueantrieb
Hohe Wärmeentwicklung auch im Nennbetrieb, Kühlung erforderlich	Mittlere Wärmeentwicklung, Kühlung erforderlich	Hohe Wärmeentwicklung auch im Nennbetrieb, Kühlung erforderlich
Wartungsarm	Wartungsarm	Wartungsarm
Einfacher Aufbau, kostengünstig	Aufwendiger Aufbau, teuer	Aufwendiger Aufbau, teuer
		Große Baugröße, hohe Wellenhöhe
Niederohmige Wicklung	Niederohmige Wicklung	Hoher ohmscher Widerstand der Wicklung
Ungeregelte Ansteuerung direkt am Netz möglich, Einsatz f. Extruder nur mit Umrichter möglich	Ansteuerung nur durch Umrichter möglich	Ansteuerung nur durch Umrichter möglich
Kein Rippeloment	Rippeloment	Rippeloment
Aufwendige Regelung, besonders im Teillastbereich und Stillstand	Gute Regelbarkeit, auch im Stillstand, volles Dauermoment im Stillstand möglich	Gute Regelbarkeit, volles Dauermoment bei kleinen Drehzahlen nicht möglich
Getriebe erforderlich, Wartung + Verluste!	Getriebe erforderlich, Wartung + Verluste!	Kein Getriebe erforderlich

Aus den Beschreibungen der Motorprinzipien geht hervor, welche Eigenschaften zu Verlusten und damit zur Reduzierung des Wirkungsgrades führen.

Die Verluste eines Motors entstehen im Kupfer der Wicklung durch unvermeidbare Stromwärmeverluste und im Eisen durch Wirbelströme und Ummagnetisierung im magnetischen Kreis.

Kupferverluste

Kupferverluste entstehen durch den ohmschen Widerstand der Kupferwicklung als stromdurchflossenen Leiter und können mit der Formel:

$$P = I^2 \times R$$

berechnet werden, wobei I für den Spulenstrom und R für den Wicklungswiderstand steht. Je hochohmiger die Wicklung des Motors ist, desto höher sind die Verluste. Wicklungslänge und Drahtquerschnitt bestimmen diesen Wert. Eine dem Statorstrom proportionale Drehmomenterhöhung führt zu einer quadratischen Erhöhung der Verlustleistung.

Eisenverluste

Der Wechselstrom durch die Wicklungen eines Motors erzeugt in dem Eisenkern (Rotor und/oder Stator) einen magnetischen Fluss, der im periodischen Takt seine Richtung ändert. Das bedeutet eine ständige Ummagnetisierung des Eisens und damit Wirbelströme im Eisen, die sich diesem Fluss entgegenstellen. Man spricht hier von frequenzabhängigen Ummagnetisierungs- und Wirbelstromverlusten, die durch die Verwendung von geblechten Kernpaketen reduziert werden können. Diese Verluste steigen mit der Drehzahl.

Kupfer- und Eisenverluste verringern sich mit steigender Baugröße bei gleicher Leistung, weil die Querschnitte für Kupfer und Eisen ebenfalls steigen.

Zusammenfassung:

- Kleinere Drehzahl → niedrigere Wirbelstromverluste
- Höheres Drehmoment → höherer Strom, quadratisch zum Strom steigende Verluste
- Bei kleineren Drehzahlen aber gleichem Drehmoment bleiben die Verluste aufgrund des gleichbleibenden Stromes im Stator gleich, aber die abgegebene Leistung fällt, damit steigt der Anteil der Verluste gemessen an der abgegebenen Leistung, damit sinkt der Wirkungsgrad.
- Größere Bauform → geringere Verluste

Außer diesen motorspezifischen Verlusten findet man im Antriebsstrang weitere Verluste durch den Einsatz von Getrieben / Riemen und Lüftern bzw. Kühlaggregaten.

Es ergibt sich die in Bild 3 dargestellte Aufteilung der Verluste:

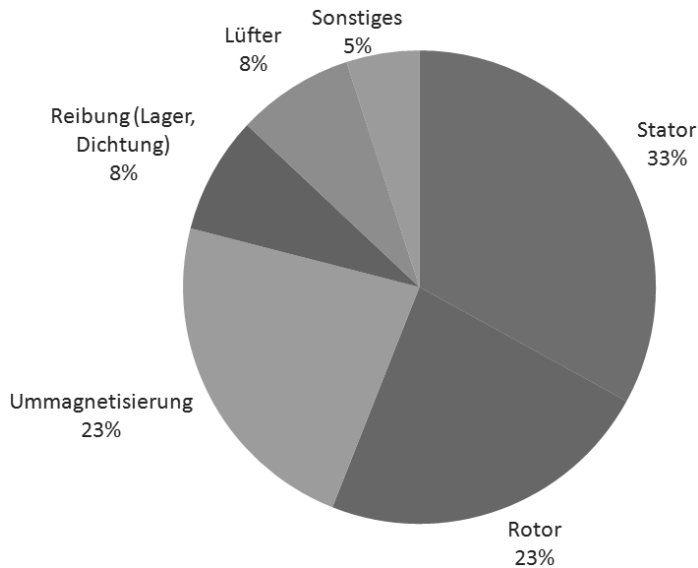


Bild 3: Exemplarische Aufteilung der Verluste eines Asynchronmotors [1]

Bei einem Synchronmotor entfallen die Rotorverluste. Dadurch ergeben sich für die Stator- und Ummagnetisierungsverluste höhere Anteile.

2. Der Begriff „Effizienz“ und seine Bedeutung für die Auswahl eines Antriebssystems in der Extruder-Branche

Früher befasste sich die technische Entwicklung in der Kunststoffextrusion eher mit der Optimierung der Prozesse, mit dem Ziel, den Durchsatz und die Qualität zu steigern. Heute gewinnen mehr und mehr auch ökologisch-ökonomische Aspekte bei der Auslegung von Maschinen Bedeutung. Auch politische Vorgaben, wie zur Einsparung des CO₂ – Ausstoßes, müssen eingehalten werden.

Nach Umfragen des Gesamtverbandes Kunststoffverarbeitende Industrie (GKV) bei den Kunststoffverarbeitern ergibt sich von Jahr zu Jahr ein erheblicher Anstieg der Energiekosten [1]. Mehr als 70% des Stromverbrauchs in der Industrie fallen auf elektrische Antriebe. Energieeinsparungen in der Antriebstechnik wirken sich daher sehr effektiv aus und erfordern entsprechende Maßnahmen schon bei der Entwicklung von neuen Maschinen.

Leider erfolgt noch in vielen Fällen die Auswahl des Antriebssystems dem Kriterium der geringsten Anschaffungskosten. Das ist sehr kurzsichtig gehandelt, da auch Lebenszykluskosten der Maschine berücksichtigt werden müssen. Denn gerade für Antriebe im Dauerbetrieb, wie sie in der Extrudertechnik üblich sind, spielen die Stromkosten eine primäre Rolle. Das Verhältnis von anfallenden Lebenszykluskosten zueinander bei einer Laufzeit von 10 Jahren zeigt das Diagramm in Bild 4.

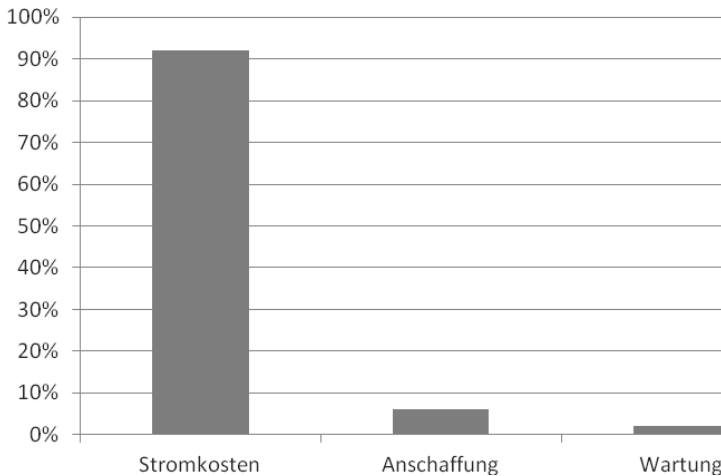


Bild 4: Aufteilung der Gesamtkosten eines 70 kW Extruderantriebes bei einer Laufzeit von 10 Jahren bei Nennlast und einem Wirkungsgrad von 90% [1]

Ein wichtiger Begriff in diesem Zusammenhang ist die Energieeffizienz. Aufgrund der steigenden Energiekosten führt eine Verbesserung der Effizienz der Maschinen zu kürzeren Amortisationszeiten. Das Maß für die Effizienz eines Antriebs ist eine messbare Größe, der Wirkungsgrad. Setzt man die vom Netz aufgenommene Leistung zu der von der Welle abgegebenen Leistung ins Verhältnis, erhält man den Wirkungsgrad. Aufgrund der Verluste eines Antriebssystems ist dieser immer kleiner als 1 ($< 100\%$):

$$\eta = P_{\text{Welle}} / P_{\text{Netz}}$$

Die aufgenommene Leistung wird anhand des aufgenommenen Phasenstromes und der Spannung ermittelt. Die abgegebene Leistung ist durch die Drehzahl und das Drehmoment bestimmt.

In diesem Wirkungsgrad sind alle Verluste des Antriebssystems, einschließlich des Umrichters, berücksichtigt, wenn die Messdaten der abgegebenen (Wellen-)Leistung direkt vor der Extruderschnecke aufgenommen werden. Oft jedoch werden die Daten unmittelbar vor und hinter dem Motor erfasst, womit der Wirkungsgrad des Motors allein bestimmbar ist. Um dann aber einen Überblick über den Wirkungsgrad des gesamten Antriebssystems zu bekommen, muss man die Verluste durch den Umrichter, das Getriebe, alle Kühlungsmaßnahmen (meistens sind dazu auch elektrische Antriebe erforderlich) abschätzen und berücksichtigen. Folgendes Diagramm (Bild 5) zeigt die Wirkungsgrade der beschriebenen Motor-typen bei 100% Last (Nenn-Drehmoment)

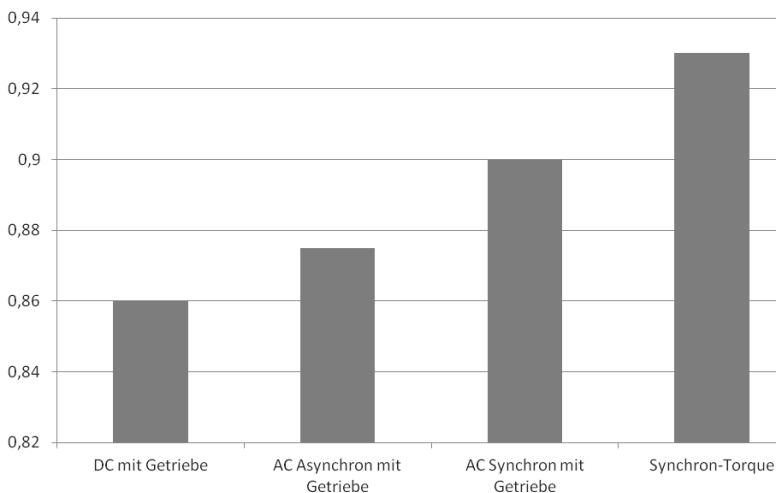


Bild 5: Wirkungsgradvergleich unterschiedlicher 100 kW Antriebe mit Umrichter im Nennbetrieb

Dieser Wert wird in den meisten Datenblättern angegeben. Man findet erhebliche Unterschiede der Motoren hinsichtlich ihrer Energieeffizienz, sowohl im maximal erreichbaren Wirkungsgrad im Nennbetriebspunkt, als auch durch unterschiedliches Wirkungsgradverhalten in Abhängigkeit vom gewählten Betriebspunkt.

Für Antriebe in der Extrudertechnik reicht es daher nicht, nur den Wirkungsgrad im Nennbetrieb zu kennen und zur Entscheidung heranzuziehen, da oft auch der Teillastbereich ausgenutzt wird und daher eine möglichst hohe Effizienz im gesamten Regelbereich benötigt wird.

Bild 6 zeigt deutlich die Grenzen der verglichenen Motortypen. Eine genaue Kenntnis über die Art und Herkunft der im elektrischen Antrieb anfallenden Verluste und deren Abschätzung ermöglicht erst eine fundierte Auswahl des Motors.

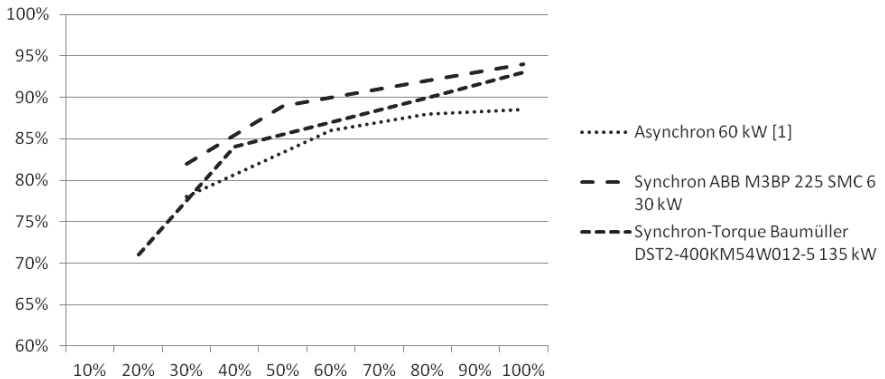


Bild 6: Wirkungsgradvergleich unterschiedlicher Motoren bei unterschiedlichen Drehzahlen

Nur im Nennbetrieb hat der jeweilige Motor seinen höchsten Wirkungsgrad.

Möchte man neben der typischen Extruderanforderung hoher Drehmomente bei niedriger Drehzahl auch Energiekosten senken, so scheint der Synchronmotor hier das bessere Ergebnis zu erzielen, denn er hat auch im Teillastbereich den höchsten Wirkungsgrad. Außerdem zeichnet er sich durch seine Wartungsfreiheit aus.

Allerdings wirken sich Getriebe mit ca. 4%, der oft verwendete Riemen mit ca. 2% und die notwendige Kühlung mit weiteren Verlusten wieder negativ auf die Gesamtbilanz aus.

Der Synchron-Torquemotor ist trotz seines innovativen Konzeptes (Direktantrieb, kein Getriebe mit entsprechenden Verlusten) aufgrund seines schlechten Wirkungsgradverlaufes zusätzlich zum Kühlungsbedarf nicht konkurrenzfähig.

Nur mit dem im folgenden Kapitel vorgestellten Cool-Torquemotor (EMF-Motors, TAE-Antriebstechnik) ist die Gesamtbilanz eines Extruderantriebes noch weiter zu verbessern.

3. Die effizienteste Antriebslösung mit dem Cool-Torquemotor

Wie eingangs erwähnt soll hier nun eine Lösung präsentiert werden, die in bisher unerreichter Weise den technischen wie auch den wirtschaftlichen Anforderungen in der Extruder-Branche gerecht wird.

In der Extruder-Technik benötigt man ein hohes Drehmoment bei niedriger Drehzahl. Auf Verluste durch Umformung der mechanischen Leistung durch Getriebe oder Riemen soll dabei verzichtet werden. Diese Bedingungen können schon mit einem Synchron-Torquemotor als Direktantrieb umgesetzt werden. Im Nennbetrieb stellt die dabei erreichbare Energiebilanz gegenüber Asynchron- oder Synchronmotor-Getriebe-Kombinationen eine gewisse Verbesserung dar, die allerdings bei weitem noch überschritten werden kann. Darüber hinaus schafft der im folgenden beschriebene Cool-Torquemotor eine vergleichsweise gute Nutzungsmöglichkeit im unteren Teillastbereich von bis zu 20% der Nennlast.

Dieser Motor arbeitet nach dem aus deutscher Entwicklung stammenden, patentierten *LiP-roKa*-Prinzip (Patent Nr. EP0910154). Sein Stator ist ähnlich aufgebaut wie bei einem herkömmlichen Synchronmotor oder Asynchronmotor. Auch der Rotor ähnelt dem eines Synchronmotors mit wechselseitig aufgeklebten Permanentmagneten aus Neodymium-Bor-Eisen-Legierung. Die Erzeugung des Drehfeldes und dessen Wirkungsweise ist bereits in den vorigen Kapiteln erläutert worden. Der Unterschied liegt in der Anzahl der Magnete auf dem Rotor, die bei diesem Motorprinzip kleiner ist, als die Anzahl der Statorpole. Dadurch ergibt sich der typische Versatz der Rotorpole gegenüber den Statorpolen. Dadurch wird auch mit einer niederpoligen Wicklung ein sehr hohes Drehmoment erzeugt [4].

In Bild 7 ist eine 2-polige Drehstromwicklung im Stator dargestellt. Die Drehfeldrichtung wird mit dem äußeren Pfeil angezeigt. Die resultierende magnetische Hauptflussrichtung liegt immer zwischen den Spulen, die am stärksten vom Strom durchflossen werden. Durch die Magnetisierung der Flussführungselemente (FE) im Stator (Zähne des Stators) haben die Permanentmagnete (FEs des Rotors) das Bestreben, sich im Drehfeld nach dieser Hauptflussrichtung auszurichten. Das gilt gleichermaßen für den vorher bereits beschriebenen Synchronmotor und den Cool-Torquemotor. Verfolgt man jedoch die Drehung der Hauptflussrichtung in Bild 7B um einen Zahn weiter, so fällt auf, dass der nächste im Zugriff stehende Permanentmagnet auf dem Rotor in Drehfeldrichtung versetzt ist und sich demnach um nur einen kleinen Winkelbetrag und – einzigartiger Weise – entgegen der Drehfeldrichtung bewegen muss. Die hohe Zahl der gleichzeitig im Zugriff stehenden Permanentmagnete bewirkt eine enorme Drehmomentsteigerung gegenüber dem Synchronmotor mit dem gleichen Wicklungsaufbau und gleicher Baugröße! Außerdem erhält man durch den Versatz der

Magnete einen besonders ruhigen Rundlauf, da das Ripplemoment weitestgehend aufgehoben ist.

Welche Drehzahl stellt sich nun ein? Maßgeblich ist zunächst auch die Frequenz des Drehfeldes. Außerdem muss man das Verhältnis der Polzahlen von Rotor und Stator berücksichtigen. Wie bei einem Getriebe rechnet man hier auch mit einem Übersetzungsverhältnis i . Die Drehzahl des Rotors berechnet sich zu

$$n = 60 \times f \times [p_R - p_S] / p_R = 60 \times f / i \quad (\text{Einheit 1/min})$$

p_R ist die Polpaarzahl des Rotors und p_S die Polpaarzahl des Stators des Cool-Torquemotors.

Das Übersetzungsverhältnis i ist negativ und beträgt:

$$i = p_R / [p_R - p_S]$$

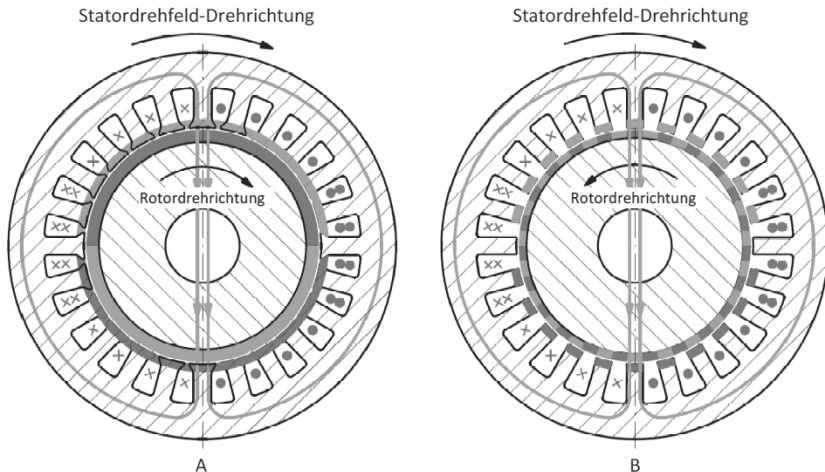


Bild 7: A: Standard-Synchronmotor-Prinzip 2 polige Statorwicklung
2 Pole im Stator, 2 Pole im Rotor
Drehfeldgeschwindigkeit im Stator: 3000/min bei 50 Hz
Rotorgeschwindigkeit ebenfalls 3000/min
Die Übersetzung ist 1

B: Cool-Torque-Prinzip, 2-polige Statorwicklung
48 Pole im Stator, 46 Pole im Rotor
Drehfeldgeschwindigkeit im Stator: 3000/min bei 50 Hz
Rotorgeschwindigkeit 130,43/min bei 50Hz
Die Übersetzung ist -23

Die Drehzahl des in Bild 7 skizzierten elektrisch 2-poligen Torquemotors entspricht der einer 46-poligen Maschine! Eine Simulation dieses Motorprinzips ist auf der Homepage der TAE-Antriebstechnik zu betrachten [6].

Bei Belastung der Welle erfolgt, ähnlich dem Synchronmotor, ein zusätzlicher Versatz zwischen den Flussführungselementen des Rotors und des Stators, der nicht größer wird, als die Hälfte ihrer Breite (max. mögl. Drehmoment bis zum Durchrutschen). Dieser Polradwinkel ist wesentlich kleiner als der des Synchronmotors. Dadurch ist eine sehr steife Regelung des Cool-Torquemotors möglich. Bild 8 zeigt das typische Belastungsdiagramm eines Cool-Torquemotors.

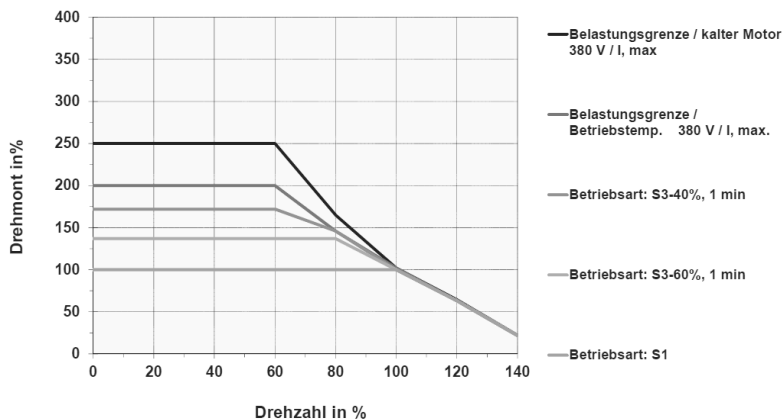


Bild 8: Typisches Belastungsdiagramm eines Cool-Torquemotors

Wegen der niederpoligen Wicklung und ihres niedrigen ohmschen Widerstandes sind die Kupferverluste sehr gering im Vergleich zu den herkömmlichen Torquemotoren. Sie entsprechen in etwa denen des Synchronmotors und liegen im mΩ-Bereich. In der Energiebilanz wirken sich in erster Linie nur noch die Ummagnetisierungsverluste im Statorblechpaket (Hystereseverluste) negativ aus, wodurch ein extrem hoher Wirkungsgrad ermöglicht wird.

Eine weitere wichtige Eigenschaft der Cool-Torquemotoren ist, dass der Wirkungsgrad ab 20% Last und ab 20% der Nenndrehzahl nahezu konstant ist (Bild 9). Die Bereitstellung des hohen Drehmomentes dieses Motors schon bei Stillstand der Welle ermöglicht das Anfahren des Prozesses nach dem Einschalten und Aufwärmen der Maschine, sowie für viele unterschiedliche Prozesspunkte im Dauerbetrieb der Extrusionsmaschine. So ist ein sicheres und

schnelles Hochfahren nach einem geplanten oder ungeplanten Stillstand des Prozesses sogar mit zäher Schmelze möglich.

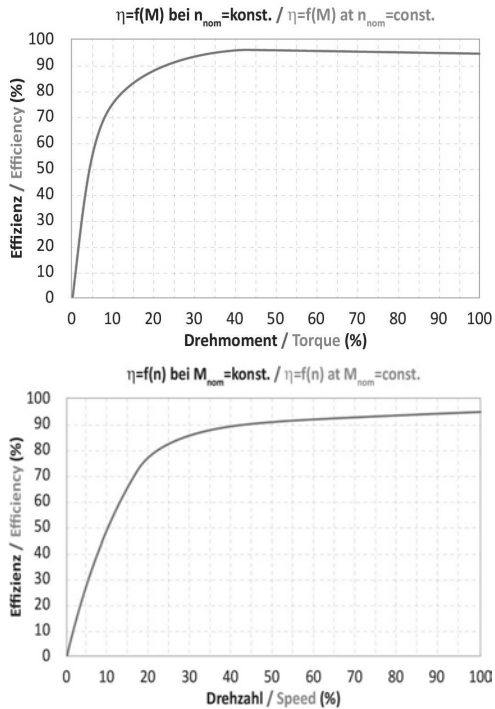


Bild 9: Typischer Wirkungsgradverlauf des Cool-Torquemotors [5]

Im Teillast- bis Nennbetrieb kommen diese Motoren in der Regel ohne Kühlung aus und können daher für den Einsatz in erschwerten Umgebungsbedingungen in der Schutzklasse IP54/55 ausgeführt werden. Die Ergebnisse bezüglich der Höhe des Wirkungsgrades und dem hohen Verhältnis von Drehmoment zu Motorgewicht werden von keinem anderen Motorprinzip auch nur annähernd erreicht.

Vorteile:

- 4 bis 6 polige Wicklung; hohe Polzahl wird durch Magnete bestimmt (44 – 110 Pole)
- Hohlwelle und Drucklagerung möglich
- Sehr steife Regelung möglich

- Gutes Anlaufverhalten (unter Last)
- Hohe Überlastfähigkeit (bis zum 2,5-fachen Nennmoment)
- Hohe Lebensdauer bei Dauerbetrieb
- Sehr kleine Kupferverluste
- Mit Abstand höchster Wirkungsgrad (bis zu 98% möglich)
- Keine Kühlung erforderlich, kein Getriebe erforderlich
- Wartungsfrei, geringe Lebenszykluskosten
- Ab Baugröße 47 mit 44 Polen verfügbar (Wicklung: 4-polig)

Nachteil:

- Vergleichsweise hoher Anschaffungspreis

Eigene Vergleichstests auf unserem Motorprüfstand haben die herausragende Position des Cool-Torquemotors bestätigt.

Das Diagramm in Bild 10 ermöglicht den Vergleich der Wirkungsgradkennlinien der beschriebenen Motoren.

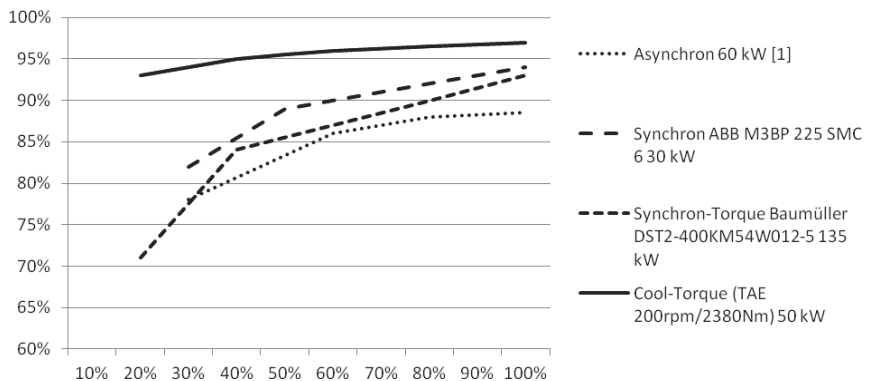


Bild 10: Bild 6 ergänzt um den Wirkungsgradverlauf des Cool-Torquemotors

Vergleich des Energieverbrauchs/Betriebswirtschaftlichkeitsberechnungen:

Berechnungsgrundlagen:

Die übliche Extruderauslastung mit einem 70 kW Antriebssystem ergibt eine Wellenleistung von 49 kW bei 70% der max. Drehzahl und 100% Last.

Ausgehend von einem S1-Betrieb in 24 Stunden am Tag in einer 6-Tage-Woche rechnet man mit ca. 7500 Betriebsstunden im Jahr.

Dieser Vergleich basiert auf einem Antriebssystem jeweils mit einem Umrichter der TAE-Antriebstechnik (U-Drive).

Tabelle 3: Vergleich der Energiekosten

	Cool-Torque-System mit U-Drive	Synchronmotor, Getriebe, Riemtrieb und U-Drive	Asynchronmotor, Getriebe, Riemtrieb und U-Drive
Gesamtwirkungsgrad in %	96	88	83
Aufgenommene Leistung in kW	51	55,7	59
Energie pro Jahr in kWh	382500	417750	442500
Energiekosten: € 0,10 pro kWh	38.250,00 €	41.775,00 €	44.250,00 €

Schon allein durch die Betrachtung der direkten Kosten ist folgende Ersparnis realisierbar [5]:

- Cool-Torquemotor gegenüber Synchronmotor € 3525,00 / Jahr - Ersparnis in 3 Jahren: 10.575,- €
- Cool-Torquemotor gegenüber Asynchronmotor € 6000,00 / Jahr - Ersparnis in 3 Jahren: 18.000,- €

Sie wird noch größer, bezieht man auch bei der Synchron- und Asynchron-Getriebekombination die Wartungskosten, Ölwechsel und Kühlungsaufwand und deren Wartung mit ein.

4. Zusammenfassung

Ein erheblicher Anteil der in der Extruder-Technik benötigten Energie wird im Antriebsstrang umgesetzt. Aufgrund des stetig steigenden Energiebedarfes und der gleichzeitigen Verknappung der fossilen Energieträger wird die Auswahl des Antriebssystems zu einem zentralen Thema bei der Entwicklung von Extruderanlagen. Die weitläufig bekannten Antriebskonzepte, bestehend aus Asynchron-, Synchronmotor mit Getriebe oder Synchron-Torquemotor ohne Getriebe erreichen ihre besten Wirkungsgrade erst mit Kühlung und nur in einem bestimmten Betriebspunkt. Dagegen übersteigt der zuletzt beschriebene Cool-Torquemotor deren erreichte Wirkungsgrade und ist zudem noch in einem weiten Lastbereich mit hoher Effizienz regelbar. Wie der Name schon ausdrückt, ist dabei keine Kühlung erforderlich. Eine Amortisation des höheren Anschaffungspreises kann bereits in wenigen Jahren erreicht werden.

5. Literaturangaben

- [1] Dipl.-Ing. Gehring, A., Forschungsstelle der SKZ.: Bewertung von Antriebskonzepten für Extrusionsmaschinen aus ökonomischer und ökologischer Sicht. Abschlussbericht. Würzburg 2010.
- [2] Europa Lehrmittel: Fachkunde Elektrotechnik, 28. Auflage 2012
- [3] SEW Antriebstechnik, Praxis der Antriebstechnik Band 1 Ausgabe 06/97
- [4] Patentschrift EP0910154 LiProKa Motor-Principle
- [5] Produktbeschreibung TAE-Antriebstechnik
http://www.taeantriebstechnik.de/fileadmin/user_upload/tae/downloads/Broschueren/Motoren/TAE_WB_Energiesparen_Torquemotor_DE.pdf
- [6] Produktbeschreibung TAE-Antriebstechnik
<http://www.tae-antriebstechnik.de/produkte/cool-torque-motoren/>

Industrie 4.0 ... mehr als ein Hype!

Herausforderungen an Kunden und Anbieter

Dipl.-Ing. (FH) **A. Winter**, Bosch Rexroth AG, Lohr am Main

Kurzfassung

Industrie 4.0 ist weit mehr als ein Hype. Die vertikale und horizontale Vernetzung weicht die klassische Automationspyramide auf und fördert neue Geschäftsmodelle. Die Einführung von Industrie 4.0 ist allerdings ein Prozess, der nicht mit einem Big Bang über Nacht umzusetzen ist. Deshalb bereitet sich Bosch Rexroth bereits seit mehreren Jahren schrittweise in der eigenen Produktion auf Industrie 4.0 vor. Die Umsetzung von Industrie 4.0 gehen wir mit einer dualen Strategie an. Als Vorreiter und Leitanwender von Industrie 4.0 loten wir in den eigenen Werken und denen der Bosch-Gruppe in zahlreichen Pilotprojekten die Potenziale der Vernetzung aus. Die dadurch gesammelten Anwendungserfahrungen aus erster Hand lassen wir direkt in die Entwicklung smarterer Automationskomponenten einfließen, wie z.B. das IoT Gateway. Beim Aufbau einer vernetzten Welt der Zukunft glauben wir, dass keine einzige Firma das allein schaffen kann. Wir glauben an Offene Plattformen, an Offene Standards, an Open Source und an Strategische Allianzen.



Bild 1: Industrie 4.0 ist mehr als nur ein Hype

1. Was ist Industrie 4.0?

Das Internet vernetzt seit Ende der 1990er Jahre immer mehr Informationen und Menschen. So wie Facebook Milliarden Menschen verbindet, die untereinander von jedem Ort der Welt aus Informationen austauschen, werden in Zukunft intelligente Geräte Daten über das Internet austauschen. Und genauso, wie Menschen sich über Facebook zu gemeinsamen Aktio-

nen verabreden, koordinieren sich die vernetzten Geräte und sprechen sich ab. Dieses Internet der Dinge eröffnet in nahezu allen Lebensbereichen neue Möglichkeiten: Autos tauschen online Daten aus, um Unfälle und Staus zu vermeiden oder Heizungsthermostate erkennen, wann die Bewohner auf dem Heimweg sind und erhöhen die Raumtemperatur rechtzeitig. Über die reine Kommunikation zwischen Maschinen hinaus verbindet das Internet der Dinge auch Maschinen und Produkte mit den Nutzern. Innerhalb des Internets der Dinge ist Industrie 4.0 der Sammelbegriff für die Vernetzung von intelligenten Maschinen mit dem Internet und der Informationstechnologie für eine effizientere Herstellung von Gütern.

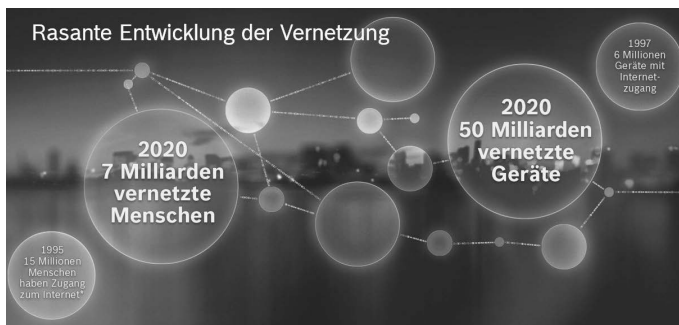


Bild 2: Rasante Entwicklung der Vernetzung

Das Internet der Dinge beeinflusst alle Lebensbereiche und Technologien. Industrie 4.0 ist der Sammelbegriff für die Vernetzung der realen Maschinenwelt mit der virtuellen Welt des Internets und der Informationstechnologie.

Unter dem Begriff Industrie 4.0 versteht man die Verknüpfung der realen Maschinenwelt mit der virtuellen Welt des Internets und der Informationstechnologie. Menschen, Maschinen und IT-Systeme tauschen zur Herstellung von Produkten automatisch Informationen aus - innerhalb einer Fabrik und über Unternehmensgrenzen hinweg. Industrie 4.0 erstreckt sich über die gesamte Wertschöpfung: Von der Entwicklung über Bestellung, Zulieferung von Komponenten und die eigentliche Produktion bis hin zur Auslieferung an den Kunden und nachgelagerten Serviceleistungen. Weil jede Information jederzeit an jeder Stelle verfügbar ist, ist es in der Industrie 4.0 sogar möglich, individualisierte Produkte und kleinste Serien wirtschaftlich herzustellen. Die Technik unterstützt dabei den Menschen besser als je zuvor. Unternehmen die Industrie 4.0 umsetzen, produzieren effizienter und ressourcenschonender zu geringeren Kosten und können flexibler auf Kundenwünsche reagieren – kurz, sie haben wichtige Wettbewerbsvorteile.

Warum spricht man von der vierten industriellen Revolution?

Die Entwicklung neuer Technologien hat in der Industriegeschichte bislang dreimal die Spielregeln grundlegend verändert. Diese Innovationen haben die Produktivität in einem Maße gesteigert, dass sie die vorhandenen Technologien abgelöst haben.

Industrie 1.0 – Mechanisierung

Die Erfindung der Dampfmaschine läutete die Industrialisierung ein. Erstmals übernahmen Maschinen menschliche Arbeit im großen Maßstab.

Industrie 2.0 – Elektrifizierung

Die Elektrizität löste die Dampfkraft ab. Sie führte auch zu neuen Formen der Arbeit: Durch die Fließbandfertigung konnten erstmals Güter in großen Serien hergestellt und dadurch kostengünstig angeboten werden. Mit Lochkarten begann die maschinelle Verarbeitung von Informationen zur Steuerung der Produktion.

Industrie 3.0 – Digitalisierung

Die Entwicklung immer leistungsfähigerer Mikrochips ermöglichte die elektronische Steuerung von Maschinen mit Software. Das machte die Maschinen produktiver, genauer und flexibler und führte zu einem immer höheren Automatisierungsgrad. In ersten Ansätzen zur Vernetzung wurden mehrere Maschinen zu einer Produktionszelle mit einer gemeinsamen Leitsteuerung zusammengefasst. Zur Koordination der Fertigung wurden Produktionsplanungs- und -steuerungssysteme entwickelt.

Industrie 4.0 – Vernetzung

Industrie 4.0 führt Menschen und digital gesteuerte Maschinen mit der Informationstechnologie und dem Internet zusammen. Das betrifft den gesamten Wertstrom. Objekte sind jederzeit eindeutig identifizierbar und kommunizieren eigenständig miteinander. Information fließen vertikal von den einzelnen Komponenten bis zur Unternehmens-IT und umgekehrt sowie horizontal zwischen den an der Produktion beteiligten Maschinen und Anlagen. So optimieren sich Produktionssysteme selbstständig und steigern die Produktivität. Der Mensch bleibt die letzte Entscheidungsinstanz und die Technik unterstützt ihn besser als je zuvor. Industrie 4.0 eröffnet nicht nur Raum für neue Produktionsabläufe, sondern auch für neue Geschäftsmodelle und Dienstleistungen

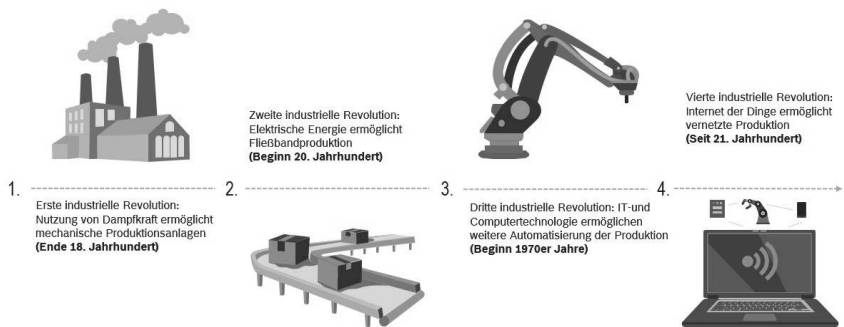


Bild 3: Entwicklungsstufen hin zu Industrie 4.0

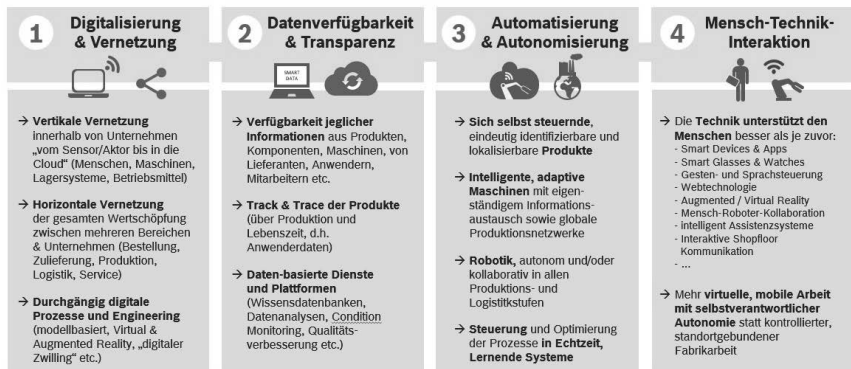


Bild 4: Was kennzeichnet Industrie 4.0?

Neue Produktionstechnologien entwickeln sich zwar evolutionär, aber sobald sie eine gewisse Reife erreichen, schaffen sie die Voraussetzungen für revolutionäre Umbrüche in der Industrie.

2. Welche Vorteile bringt Industrie 4.0? Wie weit ist die Entwicklung?

In der vernetzten Fertigung können Unternehmen ihre Produkte wirtschaftlicher herstellen und schneller auf individuelle Kundenwünsche reagieren. Denn die Umrüstzeiten, in denen die Maschinen nicht produzieren werden auf ein Minimum reduziert und die Flexibilität steigt. In der Industrie 4.0 können sich die Produktionsmittel im laufenden Betrieb weitestgehend selbst für neue Aufgaben umrüsten – ein Softwarebefehl genügt. Dieser Befehl schaltet auch automatisch Teilmaschinen an, die benötigt werden, und solche Module aus, die für den ak-

tuellen Arbeitsschritt nicht gebraucht werden. Damit können Hersteller kleine Losgrößen bis zur Einzelanfertigung zu den Kosten einer Serienfertigung realisieren. Zudem steigt die Produktivität, denn Ineffizienzen und Verschwendung werden durch höhere Transparenz im Wertstrom identifiziert. Gerade bei sich immer schneller verändernden wirtschaftlichen Rahmenbedingungen sind das entscheidende Wettbewerbsvorteile.

Nutzen bringen nicht nur neue innovative Produkte, beispielsweise mit hoher Funktionsintegration, sondern auch die Fähigkeit deren Daten nutzbar zu machen. So entstehen in der Industrie 4.0 neue Geschäftsmodelle. Die Herausforderung ist diese früh zu erkennen und umzusetzen, wobei im Zentrum stets der wirtschaftliche Nutzen stehen muss. Zum Beispiel können Unternehmen die Verfügbarkeit ihrer Maschinen und Anlagen mit vorausschauenden Wartungskonzepten innerhalb von Industrie 4.0 deutlich steigern. Sensoren und intelligente Funktionen messen ständig die Betriebszustände kritischer Komponenten. Wenn sich die Daten verändern, erkennt eine darauf ausgelegte Software den Verschleiß und sagt voraus, wann eine Komponente ausfallen wird – bevor es zu einem Maschinenstillstand kommt. Der Service tauscht die entsprechenden Komponenten geplant in Produktionspausen aus.

Industrie 4.0 spielt eine entscheidende Rolle für die zukünftige Wettbewerbsfähigkeit. Auch die Energieeffizienz in der Fertigung wird in der Industrie 4.0 weiter gesteigert. Sind Maschinen einmal vernetzt, dann ist es ein kurzer Weg, den Energiebedarf der Maschinen so zu koordinieren, dass nicht gleichzeitig alle Maschinen Höchstmengen an Strom benötigen. Das nivelliert den Energieverbrauch und vermeidet teure Lastspitzen. In einer vernetzten Fabrik der Zukunft tauschen Maschinen nicht nur Informationen aus, sondern auch Energie. Jede Beschleunigung muss auch wieder abgebremst werden. Wenn ein Motor dazu in den Generatorbetrieb schaltet, wandelt er die Bremsenergie in Strom um, der anderen Maschinen zur Verfügung gestellt werden kann. So kann einmal aus dem Stromnetz bezogene Energie zwischen verschiedenen Maschinen hin und her pendeln und mehrfach genutzt werden.

Ausgehend von komplexen Produkten werden Wertschöpfungsnetzwerke entstehen, in denen die IT-Systeme und Fertigungslinien der OEMs und ihrer Zulieferer automatisch Daten austauschen. Dadurch werden Just-in-time-Konzepte auf eine neue Stufe gehoben.

Das zeigt: Nur wer sich rechtzeitig auf Industrie 4.0 vorbereitet, kann sich in diese Wertschöpfungsnetzwerke einbinden und seine Kunden- und Zuliefererbeziehungen dauerhaft erhalten. Sicher ist: Industrie 4.0 kommt. Unternehmen, die von Anfang dabei sind, die Vernetzung in kleinen Schritten einführen und dabei lernen, gestalten den Wandel aktiv mit. Diese Unternehmen erarbeiten sich damit Wettbewerbsvorteile und sichern ihre Zukunft.



Bild 7: Duale Strategie Industrie 4.0 @ Bosch

Wie wir arbeiten: Der Weg der kleinen schnellen Schritte

Den Weg zur Einführung von Industrie 4.0 geht Bosch Rexroth in vielen kleinen, aber schnellen und überschaubaren Schritten. Bei Pilotprojekten in realer Produktionsumgebung nutzt das Unternehmen vorhandene Maschinen und Automationstechnik und ergänzt sie mit Industrie-4.0 Eigenschaften. So sammeln die Ingenieure wertvolle Erfahrungen und können die Veränderungen messen. Weil die Projekte überschaubar sind, können sie bei Bedarf schnell nachsteuern und Maßnahmen optimieren. Bei erfolgreich umgesetzten Ansätzen starten anschließend Pilotprojekte in den vor- und nachgelagerten Prozessschritten. So stellt Bosch Rexroth nach und nach den gesamten Wertstrom auf Industrie 4.0 um und nutzt zunehmend auch neu entwickelte Maschinen und Automationstechnologien. In einem weiteren Schritt werden die vernetzten Wertströme auf das internationale Produktionsnetzwerk von Bosch Rexroth ausgerollt.

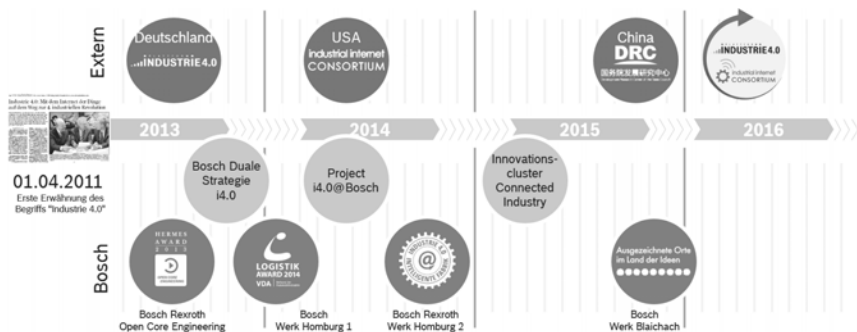


Bild 9: Die Reise von Bosch und Bosch Rexroth ins Zeitalter von Industrie 4.0

Iterativer Entwicklungsansatz

Als Anwender sammelt Bosch Rexroth in den eigenen Werken wertvolle Erfahrungen bei der Vernetzung von Maschinen mit der Unternehmens-IT. Beispielsweise wird eine voll vernetzte Multiproduktlinie kontinuierlich in ihrer Funktion erweitert. International laufen Bosch-weit über 100 Pilotprojekte zu Industrie 4.0. Die Erfahrungen als Leitanwender für Industrie 4.0 fließen in die Entwicklung neuer Automationslösungen ein.

Das macht Bosch Rexroth zum führenden Anbieter für Industrie 4.0-fähige Automation:

1. Bosch Rexroth entwickelt Produkte/Komponenten, die neuen Anforderungen an Vernetzbarkeit entsprechen.
2. Diese werden zunächst intern in eigenen Systemlösungen erprobt und anschließend in Konzeptstudien und Demonstratoren der Fachwelt vorgestellt.
3. Im nächsten Schritt kommen die Komponenten im System mit Komponenten anderer Hersteller zum Einsatz, um dort ihre Kompatibilitäts- und Standardisierungseigenschaften unter Beweis zu stellen, z.B. im Rahmen von Forschungsprojekten oder Entwicklungspartnerschaften.
4. Danach müssen sie sich in Pilotanwendungen in der eigenen Fertigung bei Bosch Rexroth und Bosch in der Praxis bewähren. Dabei decken die Anwendungen in eine Vielzahl unterschiedlicher Branchen ab, von Automotive über Maschinenbau bis zu Gebäudetechnik und Power Tools.
5. Im Rahmen von weiteren Pilotanwendungen mit interessierten Maschinenherstellern setzt Bosch Rexroth sie anschließend in realen Kunden-Umgebungen ein und startet damit die breite Vermarktung.

Die Erfahrungen in jeder Phase fließen ständig in den weiteren Entwicklungsprozess ein, bevor der Serienstart beginnt. Dadurch kann Bosch Rexroth als Technologieführer direkt ab Markteinführung praxistaugliche, Industrie 4.0-fähige Komponenten und Systemlösungen anbieten.

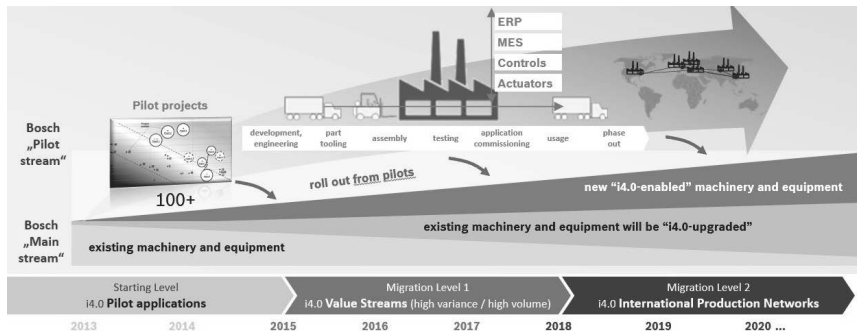


Bild 10: Systematischer Industrie 4.0 Ansatz bei Bosch und Bosch Rexroth

4. System- und Produktionslösungen

Als wegweisend für die praktische Umsetzung von vernetzten Lösungen wurde eine Multiproduktlinie von Bosch Rexroth in Homburg/Saar mit dem „Industrie 4.0 Award“ ausgezeichnet. Der Preis wird von der Fachzeitschrift Produktion gemeinsam mit ROI Management Consulting AG ausgelobt. Die unabhängige Jury bewertete die Mitte 2014 in Betrieb genommene Montagelinie als die deutschlandweit beste Umsetzung von Industrie 4.0 in der Produktion.

Auf dieser Multiproduktlinie montiert Bosch Rexroth mehr als 200 verschiedene Hydraulikventile– und das ganz ohne Umrüsten der Maschine. Wie funktioniert das? Über einen RFID-Chip ist das Werkstück und sein Verarbeitungsfortschritt an jeder Stelle im Montageprozess identifizierbar. So können die neun Stationen der Linie erkennen, welcher Arbeitsschritt zur Montage notwendig ist. Die dazugehörigen Informationen erhält die SPS-Steuerung der Maschine über einen Server. Durch diese individualisierte Fertigung wird an jeder Station nur die Anzahl der zur Bearbeitung erforderlichen Teile bereitgestellt. Bei Bedarf wird automatisch nachbestellt. Die Linie unterstützt den Mitarbeiter zudem bei der Montage. Über Bluetooth ist dieser an seiner Arbeitsstation eingeloggt. Displays zeigen die Arbeitsanweisung für die gerade zu bearbeitende Variante und den anfallenden Arbeitsschritt – und das in der vom Mitarbeiter bevorzugten Sprache und angepasst an seine jeweiligen Kenntnisse. Damit steigt auch die Produktqualität.

Das ist Industrie 4.0 in der Praxis: Mensch, Maschine und Prozess sind vernetzt. Ergebnis ist eine flexible und wirtschaftliche Fertigung der 200 Varianten der Hydraulikventile. In Zahlen heißt das im Vergleich zu den bisherigen Linien: Zehn Prozent mehr Output und 30 Prozent weniger Bestände.



Bild 11: Hochvarianz-Wertstrom-Pilot @ Bosch Rexroth in Homburg

Das Bosch-Werk Blaichach erhält den Industrie 4.0-Award für die Vernetzung sämtlicher Betriebsmittel in der Produktion und Logistik sowie für die Verarbeitung der Betriebsdaten und -zustände in Echtzeit. Das Werk fertigt mit 3270 Mitarbeitern elektronische Bremssysteme, Einspritzkomponenten, Turbolader und Sensoren für die Antriebstechnik. „Mehr als 5000 Produktionsanlagen wurden vertikal und horizontal vernetzt und die Software standardisiert. Intuitiv bedienbare Softwarelösungen unterstützen die Mitarbeiter in ihrer täglichen Arbeit“, begründet Jury-Sprecher Hans-Georg Scheibe, Vorstand der ROI Management Consulting AG, die Auszeichnung. Bosch habe es verstanden, Lösungen erfolgreich flächendeckend im Werk Blaichach und der gesamten Division einzuführen. Neben der Transparenz über die Supply Chain sei Bosch in Feldern aktiv, an die sich traditionelle Industrien nur sehr langsam herantrauten. So laufe zum Beispiel ein Pilotprojekt zur Nutzung von Felddaten in der Produktentwicklung und dem internetbasierten Produkt-Up-Date. Mit diesen Worten begründet die Jury die Auszeichnung für den Gesamtsieger Bosch-Blaichach.

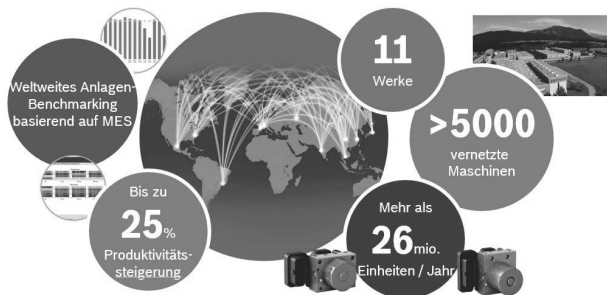


Bild 12: Hochvolumen-Wertstrom-Pilot @ Bosch in Blaichach

5. Smarte Automationskomponenten

Die Vernetzung der Fertigung ist ein Prozess, der für jeden Wertstrom individuell definiert und umgesetzt werden muss. Dies lässt sich nicht von heute auf morgen implementieren. Doch Unternehmen können sich auch schrittweise fit für Industrie 4.0 machen.

Wer das Konzept im gesamten Wertstrom umsetzen will sollte folgende Grundvoraussetzungen schaffen: Breitband-Internetanbindung, digital gesteuerte Maschinen, Maschine-zu-Maschine-Kommunikation, Anbindung an die Unternehmens-IT, zukunftssichere Investitionen, Qualifizierungsprogramme und die Betrachtung der gesamten Prozesskette. Die konkrete Umsetzung ist eine organisatorische Aufgabe, die jedes Unternehmen für sich lösen muss.

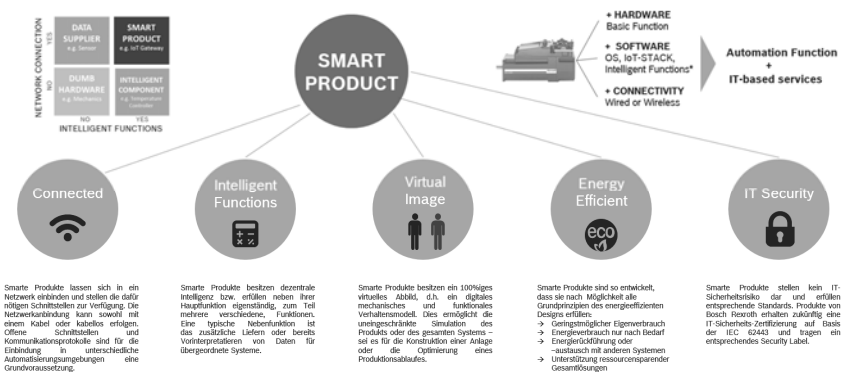


Bild 13: Was macht ein Automationsprodukt smart?

Bosch Rexroth bietet bereits ein breites Portfolio an Komponenten und Lösungen der Automatisierung für Industrie 4.0-Anwendungen. Kontinuierlich erweitert der Steuerungs- und Antriebshersteller dieses Angebot in Hard- und Software und integriert immer mehr Schnittstellen und Programmiersprachen für eine durchgängige, horizontale und vertikale Vernetzung.

IndraMotion MLC

Im Steuerungssystem IndraMotion MLC verschmelzen SPS-basierte Maschinenautomation und IT-basierte Technologien zu einem einheitlichen Komplettsystem für alle Automatisierungsaufgaben.

IndraMotion MTX

IndraMotion MTX ist die einzigartige, individuell skalierbare CNC-Plattform mit integrierter SPS.

IndraControl XM

Die Steuerungsplattform IndraControl XM bietet neueste Hardware-Technologie in einem robusten Gehäuse-Design für unterschiedliche Motion-Logic-Anwendungen.

Linear Motion System

Open Core Engineering

Basierend auf offenen Standards, Software-Tools, Function Toolkits und Open Core Interface verbindet Open Core Engineering hohe Engineering-Effizienz in der Automation mit den Technologien, Lösungen und Tools der IT-Welt.

WebConnector

Der WebConnector ist die plattformunabhängige, schnelle, einfach zu programmierende Kommunikationsschnittstelle für den Dialog zwischen Steuerung und Web- sowie IT-Anwendung.

ActiveCockpit

Als interaktive Kommunikationsplattform für die Fertigungsindustrie verarbeitet und visualisiert ActiveCockpit Fertigungsdaten in Echtzeit.

ActiveAssist

ActiveAssist verbindet durch dezentrale Intelligenz Mensch, Werkstück und Prozess.

IndraDrive servo drives

IndraDrive-Servomotorantriebe sind intelligente Automatisierungskomponenten und decken mit durchgängiger Funktionalität den Leistungsbereich von 100 W bis 4 MW ab.

IndraDrive Mi

Die neue Generation des schaltschranklosen Antriebssystems IndraDrive Mi lässt sich wie kein anderes dezentrales Antriebssystem an individuelle Rahmenbedingungen anpassen.

Linear Motion System

Das Linear Motion System (LMS) ist eine einzigartige technische Lösung für Transport und Positionierung von Materialien und Werkstücken.

IndraDyn S

Die neue Motorgeneration MS2N aus der Familie IndraDyn S von Rexroth verbindet höchste Dynamik mit kompakten Abmessungen und bester Energieeffizienz.

Hydraulic Motion Control HMC

Der neue Motion-Controller HMC ist eine digitale Steuerung mit integriertem Achsregler und Programmierung nach IEC81131-3.

IAC-Multi-Ethernet für hydraulische Achsen

IAC Multi-Ethernet-Ventile sind On Board Steuerungsplattformen für hydraulische Antriebe.

Hydraulikaggregat ABPAC

Neues Hydraulik-Standardaggregat der mittleren Baureihe. Durch die schaltschranklose Elektronik mit intelligenter Auswertelogik und optionalen Sensorkpaketen erfassen die Aggregate kontinuierlich alle Betriebszustände, zeigen Verschleißzustände an und kommunizieren über offene Schnittstellen mit übergeordneten Steuerungsebenen oder Mobile Devices.

CytroPac

CytroPac ist ein kompaktes und energieeffizientes Serienaggregat. Durch neuartiges Design sind alle entscheidenden Funktionen im Aggregat integriert.

ODiN

Die cloud-basierte Serviceplattform Online Diagnostic Network, ODiN, erfasst die Betriebsdaten hydraulischer Systeme über den gesamten Lebenszyklus, um Verschleiß frühzeitig zu erkennen.

RFID-System: ID 200

Antennen sind über das übergeordnete Steuerungssystem in Kommunikationsmodelle mit Ethernet- oder PROFIBUS-DP-Schnittstellen integriert.

Schweißsteuerung PRC 7300

Die Schweißsteuerung PRC7300 gewährleistet Prozesssicherheit und höchste Güte bei den Schweißpunkten für Schweißprozesse.

Intelligente Schrauber Nexo

Nexo Funk-Akkuschrauber fügen sich mit ihrer integrierten Steuerung in vernetzte Umgebungen ein und kommunizieren über ihr Browser-basiertes Betriebssystem mit übergeordneten Systemen.

IMS-A

Das Integrierte Messsystem Absolut IMS-A erfasst als mechatronische Baugruppe mit eigener Auswerteelektronik berührungslos hochgenau die Position bei Linearbewegungen und meldet sie an übergeordnete Systeme.

6. Ökosystem und Partner

Bosch und Bosch Rexroth sind der festen Überzeugung, dass der Aufbau von Industrie 4.0 kein Unternehmen alleine bewältigen kann. Daher glauben wir an Offene Plattformen, an Offene Standards, an Open Source und an Strategische Allianzen. Aus diesem Grund hat sich Bosch Rexroth mit dem Open Core Engineering komplett geöffnet. Anwender haben die Möglichkeit in den verschiedensten (Hoch-)sprachen zu entwickeln und müssen sich so nicht

an eine Sprache binden. Eine Verschmelzung von SPS- und IT-Automation ist einfach möglich und eröffnet so neue Geschäftsmodelle.

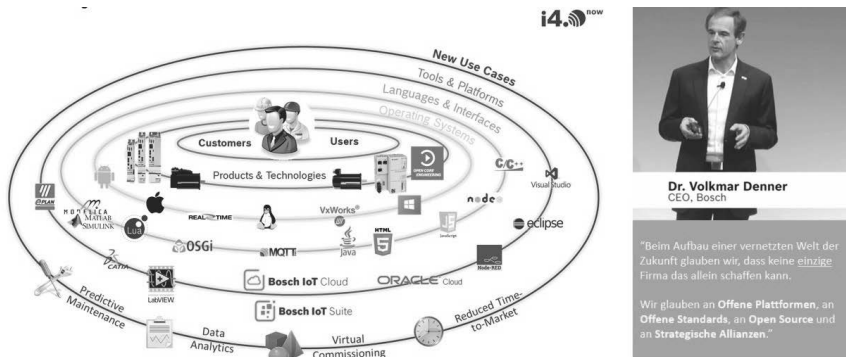


Bild 14: Ökosystem & Partner: Zusammen auf dem Weg zu Industrie 4.0

7. Industrie 4.0 in der Praxis angekommen?

Mit dem Showcase Manufacturing i4.0, den Bosch Rexroth 2016 auf der Hannover Messe der Öffentlichkeit vorgestellt hat, erleben Sie eine Fertigungsline, die nach i4.0-Kriterien die Massenproduktion individualisiert. Die modular aufgebaute Fertigungsline zeigt anhand der variantenreichen Bearbeitung und Montage, dass Industrie 4.0 für eine höhere Produktivität und Flexibilität bereits heute umsetzbar ist. Alle Stationen sind durchgängig über offene Schnittstellen horizontal und vertikal vernetzt und stellen sämtliche relevanten Informationen in Echtzeit bereit. Das flexible Fertigungskonzept verbindet mittels modernster Automatisierungs- und IT-Technologie vollautomatische und manuelle Arbeitsstationen zu einer durchgängigen Produktionslösung. Alle notwendigen Informationen werden mit übergeordneten IT-Systemen, bis hin zur Cloud, nahtlos ausgetauscht. Die herzustellenden Produkte übermitteln selbst ihre erforderlichen Produktionsdaten und schaffen damit die Voraussetzung für die wirtschaftliche Herstellung von Losgröße 1 bei Rüstzeit 0.

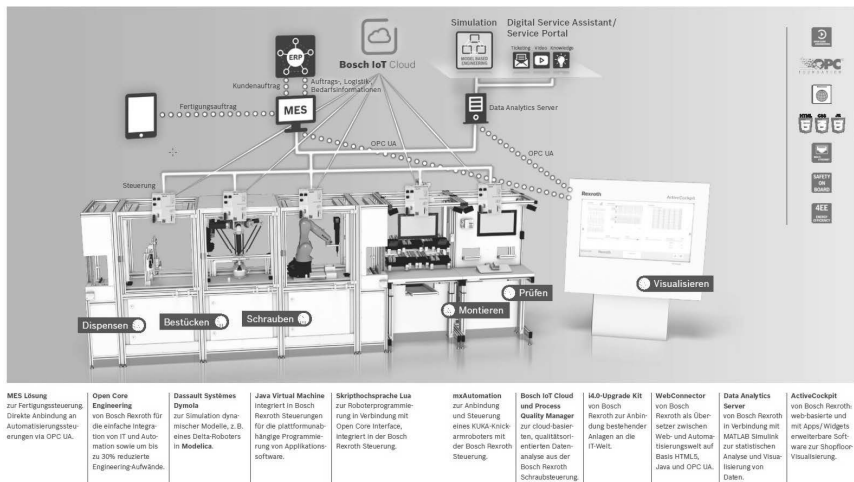


Bild 15: Showcase Manufacturing i4.0 auf der Hannover Messe 2016.

Rohstoffaufbereitung / Rohstoffversorgung

Lagern, Fördern, Trocknen, Dosieren / Mischen, Steuern

Dipl.-Ing. (FH) **A. Koschmieder**,
motan-colortronic GmbH, Friedrichsdorf

materials management für die Blasform-Industrie

Das Material-Handling im Upstream-Bereich der kunststoffverarbeitenden Prozesse (Spritzguss, Blasformen, Extrusion) hat einen erheblichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit des Gesamtprozesses bei der Herstellung von Kunststoffprodukten. Mit Material-Handling ist die Peripherie vor der Verarbeitungsmaschine gemeint, also Lagereinrichtungen, Trocknungs-, Dosier- und Mischsysteme, sowie die zugehörigen Steuerungen. Um variable Materialdurchsätze, die nötigen Trocknungsgrade und die zum Erhalt der geforderten Qualität erforderliche Rezepturtreue zu erzielen und reproduzierbar zu halten, bedarf es einer durchdachten und präzisen Materialversorgung.

materials management for the blow moulding industry

At plastics processes (injection moulding, blow moulding, extrusion) the materials handling has a great influence on the economic efficiency of the overall process. Materials handling means the peripheral equipment in front of the process machine, so storage, drying, dosing and mixing equipment and the associated controls. It needs a specific and precise supply of materials to achieve all necessary targets, e.g. variable material throughputs, necessary drying grades and a good product quality based on recipe constancy and reproducibility.

1. Projektbezogene Anlagenkonfiguration und Materialeigenschaften

Den Anfang zur optimalen Auslegung und Konfiguration der Materialversorgung macht eine umfassende Projektplanung, an der sich vorzugsweise alle Projektpartner beteiligen. Grund dafür ist der vielfältige Einfluss der Materialeigenschaften auf die Peripheriegeräte, sowohl hinsichtlich Lagern, Fördern und Trocknen, als auch beim Dosieren und Mischen.

Bei allen Überlegungen spielt die Schüttgutmechanik eine entscheidende Rolle. Zu klären sind die vorliegende Schüttdichte, die Korngrößen sowie die Schüttwinkel. Danach lässt sich beurteilen, ob das Material leicht fließt, Brücken bildet oder gar haftet. Leicht und normal fließende Materialien werden auch als „frei fließend“ bezeichnet, das heißt sie weisen einen so genannten Böschungswinkel (Schüttwinkel) von Null bis 45° auf. Sie benötigen während des Förderns keine zusätzliche Aktivierung, weshalb auf den Einsatz von Rührwerken verzichtet werden kann. Schwer fließende Materialien weisen hingegen Böschungswinkel von 45° bis über 60° auf. Besonders schwierig zu handhaben sind nicht rutschende, adhäsive Materialien, die sich verhaken, Brücken bilden und nur schwer zu trennen sind. Darunter fallen beispielsweise Flakes oder bestimmte Pulver.

2. Lagern

Das Lagerkonzept muss spezifische Kriterien erfüllen, die sich zunächst an den zu versorgenden Produktionsanlagen und damit am erforderlichen Durchsatz orientieren. Davon abhängig sind etwa die Zahl der zu bevorratenden Materialsorten und die benötigten Mengen. Sind Kleingebinde (Sackware mit 25 kg/Gebinde) oder Großgebinde (BigBags, Oktabins mit bis zu 1000 kg) zu lagern, oder sind Silos wirtschaftlicher. Weitere Kriterien sind unter anderem der erforderliche Flächenbedarf oder die Entsorgung des Verpackungsmaterials.

Einfluss auf die Lagerung, sowie später auf das Fördern, haben schließlich die Materialeigenschaften. Bei hygroskopischen Kunststoffen ist an die Feuchteaufnahme zu denken, was besonders im Sommer problematisch sein kann. Wird umgekehrt Material aus einem kalten Lager in die warme Produktionsumgebung gefördert, kann sich Feuchtigkeit daran niederschlagen. Bei der Anlagenplanung sollten überdies lokale klimatische Besonderheiten berücksichtigt werden, etwa der geographische Standort. Natürlich ist bei der Lagerung auch darauf zu achten, dass das Material nicht verunreinigt wird.

3. Fördern

Beim Fördern wirken sich die Materialeigenschaften auf die notwendige Luftgeschwindigkeit und die Wahl der Rohrleitungsquerschnitte, im Hinblick auf den geforderten Durchsatz, aus – und damit auf die Förderpumpenauslegung. Auch das Rohrleitungsmaterial ist entsprechend auszuwählen. Je nach Komplexität und Konzept einer Anlage sind zudem Trockenluftförderung oder eine erforderliche Leersaugung zu berücksichtigen.

Für die Auslegung der Materialversorgung ist schließlich das Abrasionsverhalten des Förderguts zu beachten, was insbesondere das Material von Rohrleitungen und Rohrleitungsbögen betrifft. So können in Einzelfällen Rohrbögen aus Glas erforderlich sein. Einfluss auf die Konfiguration der Materialversorgung haben neben den geplanten Durchsätzen und den räumlichen Bedingungen auch spezifische Prozessanforderungen. Im Einzelfall, etwa bei schwierigen Materialien, sind vorab verfahrenstechnische Untersuchungen empfehlenswert. Hierfür hat motan in allen Regionen weltweit eigene Tech-Center eingerichtet.

3.1 Projektgerechte Materialförderung

Das Förderprinzip richtet sich nach der Lieferform (Granulat, Pulver) des Förderguts. Weitere Kriterien sind der benötigte Gesamtdurchsatz sowie der Bedarf der einzelnen Abnahmestellen. In diesem Zusammenhang ist erforderliche die Flexibilität des Systems zu klären, sowohl hinsichtlich häufiger Materialwechsel, als auch wechselnder Abnahmestellen. Zu berücksichtigen sind ferner die Förderstrecken zwischen Lager und Abnahmestellen, wobei neben der absoluten Rohrleitungslänge auch Richtungswechsel sowie die Höhenunterschiede in die Berechnungen eingehen. Hinzu kommen natürlich noch kundenspezifische Anforderungen.

Auch Überlegungen hinsichtlich einer Automatisierung sollten bei der Konzeption einer Materialversorgung frühzeitig berücksichtigt werden. Dann können entsprechende Schnittstellen an der Steuerung zur Einbindung in übergeordnete Systeme erforderlich sein, seien es Materialwirtschaftssysteme oder eine zentrale Anlagensteuerung. In diesem Zusammenhang gilt die OPC-UA-Schnittstelle (Open Platform Communications – Unified Architecture) als Basis für Industrie 4.0.

Im Regelfall wird für die Materialversorgung ein Saugfördersystem infrage kommen. Die Druckförderung kommt überwiegend bei der Herstellung von Kunststoffen zum Einsatz. Sie eignet sich insbesondere für sehr hohe Durchsätze ($>3t/h$), zum Befüllen von Außensilos sowie für das Fördern von Pulver.

In der Kunststoffverarbeitung hat sich hingegen die Vakuum- oder Saugförderung als geeignetes Prinzip bewährt. Übliche Durchsatzraten sind hier bis zu drei Tonnen je Stunde, wobei die Luft- und damit die Materialgeschwindigkeit besonders zu beachten sind.

Bei der Saugförderung beträgt die Luftgeschwindigkeit in der Regel 20-30 m/s; im Mittel etwa 25 m/s, woraus sich eine mittlere Materialgeschwindigkeit von 17 m/s ergibt. Je nach Material reicht das Spektrum von 14-20 m/s. Die Beladung liegt bei der Saugförderung bei rund einem bis 10 kg Material/kg Luft (ca. 1m³). In diesem Bereich stellt sich eine Flugförderung ein. Das heißt, in den Förderleitungen befindet sich eine Schar von vereinzelt Granulaten, die im Luftstrom bewegt werden. In der Flugförderung kommt es nicht zur Bodensatzbildung.

Für die Praxis sind dabei zwei Aspekte wichtig: Ist die Luftgeschwindigkeit zu niedrig (<20m/s), bilden sich zunächst dünenartige Ablagerungen am Boden der Rohrleitung. Aus der Flugförderung wird eine Strähnenförderung, die schlimmstenfalls in eine Pfropfenförderung mit instabilen Förderbereichen übergeht.

Ist die Luftgeschwindigkeit hingegen zu hoch, werden sowohl das System als auch das Fördergut sehr stark belastet. In den Rohrleitungen, besonders in den Rohrbögen, steigt der Verschleiß durch Materialabrieb, was zu durchgescheuerten Bögen führen kann. Zugleich schädigt eine zu hohe Geschwindigkeit das Fördergut. Der Abrieb an den Granulatoberflächen wirkt sich spätestens bei der Verarbeitung aus. Sichtbare Merkmale einer Materialschädigung sind etwa Engelshaar, Fäden und Staub, was bei transparenten, dünnwandigen Formteilen zu sichtbaren Fehlstellen (Schlieren) und damit zu Ausschuss führt.

Um dies und Probleme in darauf folgenden Prozessschritten (z.B. Dosierung) zu vermeiden, sind Staub, Fäden oder Engelshaar weitestgehend bei der Entstehung zu minimieren. Bereits entstandene Stäube sind während der Förderung aus dem Prozess zu entfernen. Hier können geeignete Konzepte zur Staubreduzierung zu einer gleichbleibend hohen Produktqualität beitragen.

3.2 Einzelgeräte oder zentrale Anlagen (Systeme)

Grundsätzlich unterscheidet das Material-Handling zwischen Einzelfördergeräten und zentralen Anlagen. Je mehr Maschinen in einer Produktion stehen, desto mehr Fördergeräte sind zwangsläufig erforderlich, was zu der Frage führt, ob statt einer dezentralen nicht eine zentrale Materialversorgung zweckmäßiger ist. Die dezentrale Materialversorgung, etwa mit einem BigBag an der Maschine, ist aus vielen Gründen problematisch: Platzverbrauch, Schmutz und Staplerverkehr neben Verarbeitungsmaschinen sind möglichst zu vermeiden. Denkbar ist natürlich die Kombination von Einzelfördergeräten und zentralen Fördersystemen mit einer zentralen Gebläse- und Filterstation sowie separaten Systemfördergeräten auf den Maschinen. Systemfördergeräte lassen sich heute anwendungsspezifisch mit verschiedenen Modulen konfigurieren (Filter- bzw. Vakuummodul, Materialeinlassmodul, Abscheide- modul, Materialauslaufmodul und Steuerbox/Elektrik).

Speziell bei hohen Durchsätzen in Verbindung mit vielen Abnahmestellen (Verarbeitungsmaschinen) ist jedoch eine zentrale Materialversorgung immer vorzuziehen.

3.3 Trockenluftförderung

Prinzipiell kann die Materialförderung mit normaler Umgebungsluft oder mit trockener Luft erfolgen. Da die Kontaktzeit mit der Luft während des Fördervorgangs relativ kurz ist, arbeiten in rund 90% aller Anwendungen die Systeme mit normaler Umgebungsluft in einem offenen Kreislauf. Dazu befindet sich unter dem Vorratsbehälter eine Absaugstelle (Absaugkasten) für das Material sowie ein seitlicher Einlass, um die Umgebungsluft anzusaugen. Den Unterdruck erzeugt eine Vakuumpumpe. Auf diese Weise wird das Material an die entsprechende Abnahmestelle gesaugt. Die gefilterte Förderluft wird nach der Vakuumpumpe über ein Auslassventil ausgestoßen.

Ist das Material stark hygroskopisch, sollte es mit Trockenluft gefördert werden. Wird stattdessen Umgebungsluft verwendet, besteht die Gefahr einer Rückbefeuchtung. Im Betrieb mit Trockenluft arbeitet das System luftseitig im geschlossenen Kreislauf.

3.4 Materialbezogenes oder maschinenbezogenes System

Bei zentralen Anlagenkonzepten kommen zwei Varianten infrage: Der Aufbau als materialbezogenes System oder als maschinenbezogenes System.

Beim materialbezogenen System befinden sich die Materialvorräte außerhalb der Produktion in einem separaten Vorratsraum. Von jeder Materialquelle geht eine eigene Leitung mit Abzweigen zu den Abnahmestellen (Verarbeitungsmaschinen). Materialwechsel erfolgen direkt an der Maschine durch Umkuppeln der jeweiligen Zuführungsleitung.

Beim maschinenbezogenen System erfolgt die Materialaufgabe ebenfalls zentral und separat von der Produktion. Im Unterschied zum materialbezogenen System werden die Materialleitungen zu einer zentralen Verteilstation, einem so genannten (manuellen) Kupplungstisch (vielfach auch Kupplungsbahnhof genannt) verlegt. Von dort erfolgt schließlich die Verteilung über direkte maschinenbezogene Leitungen zu den einzelnen Verbrauchern. Grundsätzlich bietet ein maschinenbezogenes System die größtmögliche Sauberkeit, denn sowohl die Materialaufgabe als auch das Umkuppeln finden außerhalb der Produktion statt. Das System ist überdies reinraumfähig und benötigt vergleichsweise wenig Platz.

Einziger nennenswerter Nachteil ist, dass bei Materialwechseln das Umkuppeln der Versorgungsanschlüsse zu den einzelnen Verbrauchern manuell erfolgen muss. Kupplungstische gibt es wahlweise in uncodierter oder codierter Ausführung. Das manuelle Umstecken uncodierter Kupplungen gilt allerdings als latente Fehlerquelle, mit teuren Folgen, falls an eine Maschine das falsche Material gefördert wird. Weitaus sicherer ist hingegen eine mit RFID-Technologie (Radio Frequency Identification) codierte Ausführung. Mittels der RFID-Technik wird überprüft, ob der in der Fördersteuerung ausgewählte Materialweg (Quelle/Ziel) am Kupplungstisch mechanisch (Quellen-Kupplung und Ziel-Leitung) auch richtig verbunden ist. Nur wenn eine Übereinstimmung zwischen vorgewählter Zuordnung und real gekuppelter Verbindung existiert, wird die Materialquelle durch die Fördersteuerung freigegeben und das Materialziel (Verarbeitungsmaschine) kann das gewünschte Material in das Ziel-Fördergerät ansaugen.

Eine Alternative sind automatisierte Materialverteilsysteme, für die sich zwei Varianten anbieten:

- Serielle Materialverteilung
- Parallele Materialverteilung

Die serielle Ausführung kann je nach Konzept über eine so genannte Drehrohrweiche oder einen Drehteller erfolgen, wobei das Anschlussprinzip weitgehend identisch ist: Auf der einen Seite kommen die Zuleitungen der verschiedenen Materialquellen an, von der gegenüberliegenden Seite gehen die Leitungen zu den einzelnen Verbrauchern ab. Beim Drehtellerkonzept befindet sich mittig angeordnet besagter Drehteller, der je nach Bedarf einen Strang von der Materialseite mit einem Strang zur Abnahmeseite verbindet. Benötigt eine andere Maschine das gleiche Material, dreht die Weiche weiter, um die entsprechende Zuleitung dieser Maschine mit der Zuleitung des angeforderten Materials zu verbinden.

Ganz anders arbeitet das vollautomatische, parallele Materialverteilsystem METROLINK von motan, dessen Prinzip mit einem Kupplungsbahnhof vergleichbar ist. Auch hier kommen die Materialquellen von der einen Seite, die Abgänge zu den Verbrauchern sind jedoch rechtwinklig dazu angeordnet. Jede Maschine (Ziele) hat einen eigenen Drehteller, der zwischen den Materialien (Quellen) schaltet. Es gibt folglich keine „Kreuzung“ der Material-Versorgungsleitungen zu den Maschinen, sie sind vielmehr sauber voneinander getrennt. Bei der parallelen Materialförderung lassen sich gleichzeitig mehrere Maschinen mit mehreren verschiedenen Materialien versorgen; Materialverschleppungen sind hierbei ausgeschlossen. Zudem lassen sich die Leitungen über Leersaugmodule zusätzlich reinigen. Das System muss insgesamt weniger schalten und ist folglich nicht so stark mechanisch belastet wie serielle Materialverteilungen.

4. Trocknen

Auch beim Trocknen spielen die Materialeigenschaften eine wichtige Rolle. Zu unterscheiden ist zwischen nicht hygroskopischen und hygroskopischen Kunststoffen. Bei den nicht hygroskopischen Kunststoffen lagert sich Feuchtigkeit nur an der Oberfläche an. Hygroskopische Kunststoffe nehmen Wasser hingegen in ihrer Molekülstruktur auf. Vorsicht ist geboten bei Compounds auf Basis nicht hygroskopischer Kunststoffe, da die enthaltenen Füllstoffe einem an sich nicht hygroskopischen Kunststoff durchaus ein hygroskopisches Verhalten verleihen können.

Wichtige Prozessparameter für das Trocknen von Kunststoffen und damit für die Auslegung von Trockentrichtern und Trockenlufterzeugern sind die Trocknungstemperatur, die Luftmenge bzw. Trockenluftmenge, die Trockenzeit und der Taupunkt. Die Trocknungstemperatur hat den größten Einfluss auf die Trocknungsgeschwindigkeit und bestimmt, zusammen mit dem Taupunkt, die erreichbare Endfeuchte im Granulat. Der zu erbringende Materialdurchsatz legt die Prozessluftmenge und über die notwendige Trockenzeit die Trockensilogröße fest. Alle genannten Parameter haben im Wechselspiel zueinander Einfluss auf die Trocknungsqualität.

4.1 Wirkung von Feuchtigkeit im Granulat

Bei nicht hygroskopischen Kunststoffen geht die Feuchtigkeit beim Aufschmelzen in den gasförmigen Zustand (Wasserdampf) über, was im Endprodukt unter anderem zu Blasen- und Schlierenbildung führen kann.

Bei hydrolyseempfindlichen Kunststoffen löst die Feuchtigkeit während des Aufschmelzens eine chemische Reaktion (Hydrolyse) aus, welche die Molekularstruktur verändert. Folgen davon sind eine verringerte Schmelzviskosität und schlechtere mechanische Eigenschaften. Dagegen hilft nur eine konsequente, zielgerichtete und energieoptimierte Materialtrocknung. Eine Übertrocknung der Materialien ist zu vermeiden.

4.2 Trocknungsverfahren

Beim Trocknen von Kunststoffen erfolgt die Wärmeübertragung durch Konvektion („Mitführung“) oder Strahlung, weshalb von Konvektionstrocknern oder Strahlungstrocknern gesprochen wird. Typische Konvektionstrockner sind Warmluft-, Trockenluft-, Druckluft oder Vakuumtrockner; Strahlungstrockner sind beispielsweise Infrarot- oder Mikrowellen-Trockner.

5. Dosieren und Mischen

Die Materialeigenschaften, insbesondere das Fließverhalten, beeinflussen natürlich auch die Auswahl des Dosierverfahrens und daher Auswahl und Auslegung der Dosiergeräte einschließlich der Austragsorgane. Genauigkeit und Rezepturtreue sind ausschlaggebend für eine reproduzierbare Mischungsqualität und schlussendlich für die Produktqualität.

Prinzipiell wird zwischen volumetrischen und gravimetrischen Dosiersystemen unterschieden. Volumetrische Dosiersysteme eignen sich für Anwendungen, bei denen die Schüttguteigenschaften der verwendeten Dosiergüter weitgehend konstant bleiben und keine zerti-

fizierungsrelevanten Verbrauchsnachweise erforderlich sind. Beispielsweise können Schwankungen in der Schüttdichte nicht automatisch detektiert werden und haben damit Einfluss auf die Rezepturtreue.

Gravimetrische (gewichtsgeregelte) Dosiersysteme können Änderungen der Dosiermasseströme erkennen und haben daher im Allgemeinen eine weitaus höhere Langzeitdosiergenauigkeit als volumetrischen Systeme, was hinsichtlich erwünschter Materialeinsparungen, insbesondere bei teuren Additiven und Farbmasterbatches, von Vorteil ist. Weitere Vorteile gravimetrischer Systeme sind unter anderem, dass sie nicht kalibriert werden müssen, dass sie Soll- und Istwert vergleichen sowie die Toleranzbänder überwachen und somit unabhängig von Schüttguteigenschaften arbeiten.

Zu unterscheiden ist zwischen diskontinuierlich arbeitenden Chargendosiergeräten/Batchblendern (Gain-In-Weight) und kontinuierlich arbeitenden Synchrondosiersystemen (Loss-In-Weight).

5.1 Asynchron gravimetrische Chargendosiersysteme (Gain-In-Weight)

Chargendosiersysteme arbeiten asynchron gravimetrisch, wobei sie die Komponenten einzeln nacheinander in den Wiegebehälter dosieren. Diese Verhältnisdosierwaagen sind meist nur mit einer Wiegezeile ausgestattet. Oberste Priorität hat die Rezepturtreue, während das Chargengewicht lediglich als Arbeitsgrundlage dient. Das heißt, die Systeme halten automatisch die jeweiligen prozentualen Anteile der zu dosierenden Komponenten ein.

Häufig werden bei Chargendosiersystemen als zweite und weitere Komponenten Additive oder Farben mit einer Mikrodosierung in Kleinstmengen dosiert. Die Haupt- und NebenkompONENTEN werden nacheinander Schicht für Schicht in eine Wiegekammer eingewogen und anschließend in eine Mischkammer entleert. Danach öffnet ein Verschlussorgan (Schieber) und das Material kann in den Materialbehälter der Maschine auslaufen. Die Chargendosiersysteme sind mit einem aktiven Mischer ausgestattet, um die durch die Verwiegung gebildeten Schichten miteinander zu vermischen. Deshalb ist die Mischzeit entsprechend der Materialien richtig zu wählen, damit Materialien mit unterschiedlichen Schüttdichten, während des Mischvorgangs, nicht wieder entmischt werden.

5.2 Synchron gravimetrische Differentialdosiersysteme (Loss-In-Weight)

Die höchste Dosiergenauigkeit lässt sich mit Differentialdosiersystemen erzielen. Der Vorratsbehälter (Wiegebehälter) und die komplette Dosiermechanik sind fest miteinander verbunden und werden komplett, inkl. des Materialvorrates, verwogen. Es kann somit kein durch eine Materialsäule verursachter Kraftschluss zwischen Dosierorgan und Wiegebehälter entstehen. Jedes Dosiermodul hat ein eigenes hochauflösendes Wiegesystem. Alle Komponenten werden zeitsynchron und rezepturgerecht dosiert wobei die Dosierströme online überwacht und geregelt werden. Differentialdosierwaagen werden auch als Loss-In-Weight Systeme bezeichnet.

Der Gewichtsverlust im Wiegebehälter wird in sehr kurzen Zeitintervallen von der Wiegezelle gemessen. Aus diesem Gewichtsverlust ermittelt das System den von der Dosierung aktuell abgegebenen Massestrom. Dieser Ist-Durchsatz wird mit dem in der Steuerung hinterlegten Soll-Durchsatz verglichen. Sofern der Ist-Wert höher als der Soll-Wert ist, regelt die Steuerung die Drehzahl des Dosierorgans herunter – oder erhöht sie analog im umgekehrten Fall. Der gesamte Ablauf des gravimetrischen Dosierens ist in die drei Phasen Nachfüll-, Beruhigungs- und gravimetrische Dosierphase unterteilt. Während des kurzen Nachfüllvorgangs erfolgt eine Gewichtszunahme im Wiegebehälter, während gleichzeitig kontinuierlich über das Dosierorgan Masse ausgetragen wird. In dieser Phase kann die Steuerung den Dosierstrom nicht regeln, weshalb das System in der Nachfüll- und Beruhigungsphase volumetrisch arbeitet. Der Nachfüllvorgang selbst wird durch das Unter- bzw. Überschreiten von vorgegebenen Gewichtsniveaus gesteuert. Zwischen den Nachfüllungen wird kontinuierlich gravimetrisch dosiert.

Abhängig von den Schüttguteigenschaften sind die einzelnen Dosierorgane unterschiedlich ausgestattet. Für leicht bis normal fließende Materialien (Granulate, einige Mahlgüter und Grieße) ist keine zusätzliche Materialaktivierung erforderlich. Für schwer- bis nicht rieselfähige Materialien in granulatformiger, faseriger, pulverförmiger oder flüssiger Ausführung sind zusätzliche Materialaktivierungen notwendig. Damit sind Einrichtungen zum Auflockern beziehungsweise zur Unterstützung der Materialförderung zu verstehen, etwa Rührwerke. Hinzu kommt, dass bei schwer- bis nicht rieselfähigen Materialien nicht nur im Dosierorgan, sondern auch in den Nachfüllbehältern entsprechende Aktivierungssysteme erforderlich sind. Deren Prinzip und Auslegung richtet sich nach der Materialbeschaffenheit. So kommt es beispielsweise bei Fasern darauf an, dass die entsprechenden Aktivierungs-Aggregate moderat agieren um Materialschädigungen (Faserbruch, -spleiß) zu verhindern. Aufgabe der Aktivie-

nungssysteme ist, eine kontinuierliche und gleichmäßige Materialfüllung des Dosierorgans zu gewährleisten, da andernfalls Produktionsstörungen oder Qualitätsmängel zu erwarten sind.

6. Steuern

Vor dem Hintergrund, dass der Datenaustausch zwischen Anlagen, Maschinen und Prozessen zunehmend an Bedeutung gewinnt, nimmt die Systemvernetzung einen immer größeren Stellenwert ein. Hierbei ist, neben der horizontalen, vor allem die vertikale Integration von wachsender Bedeutung. Gemeint ist damit der Datenaustausch von Steuerungen der Produktionsebene mit übergeordneten Systemen, etwa ERP-Systeme (Enterprise Resource Planning), in denen die Materialwirtschaft eines Produktionsunternehmens integriert ist.

Aktuell sind die dazu erforderlichen Schnittstellen noch sehr kunden- und herstellerspezifisch konzipiert. Mit der Einführung der OPC-UA-Schnittstelle (Open Platform Communications – Unified Architecture) steht künftig eine hersteller- und plattformunabhängige Datenschnittstelle zur Verfügung. Die Software ist ein offener internationaler IT-Standard, der bereits vielfach im Maschinenbau eingesetzt wird und die Empfehlung der europäischen Fachverbände für die Kunststoff-Branche trägt. OPC-UA ist dank seiner Skalierbarkeit auf allen Betriebssystemen lauffähig. Das ermöglicht beispielsweise die Kommunikation zwischen den motan-Geräten und dem übergeordneten Manufacturing Execution System (MES), lässt sich aber auch für die direkte Kommunikation zwischen Maschine und Peripherie einsetzen.

Möglichkeiten und Grenzen der Energieeinsparungen

B. Stipsits, Blue Air Systems GmbH, Kundl, Österreich

Inhalt

1. Generelle Idee: Wozu Werkzeugtrocknung?
2. Entstehung und Problematik von Kondensat auf Werkzeugen
 - 2.1. Was ist der Taupunkt? Wieso und unter welchen Bedingungen kondensiert Feuchtigkeit?
 - 2.2. Problematik bei der Produktion von Kunststoffteilen
3. Möglichkeiten zur Vermeidung von Kondensation am Werkzeug
 - 3.1. Erhöhung der Oberflächentemperatur über die Taupunkt-Temperatur der Luft
 - 3.2. Senkung des Taupunkts der Umgebungsluft durch Trocknung der Luft
 - 3.3. Vermeidung von Kondensat durch Klimaanlage
 - 3.4. Die optimale Kühltemperatur
4. Arten der Formentfeuchtung und deren Vor- und Nachteile
 - 4.1. Kondensationstrocknung
 - 4.2. Adsorptionstrocknung
 - 4.3. Große Nachteile bei beiden Technologien
5. Neue Technologien, Closed-Loop-Verfahren
 - 5.1. Modellrechnung: Vergleich einer Werkzeugentfeuchtung mit nur 15 % Energieeinsatz gegenüber einer konventionellen Strategie
 - 5.2. Vergleichstabelle der Formentfeuchtungsarten

1. Generelle Idee: Wozu Werkzeugtrocknung?

Die meisten geformten Kunststoffprodukte, seien es gespritzte, geblasene oder vakuumgeformte (thermogeformte) Produkte, werden durch Kaltwasser in der Kavität der Form gekühlt. Die Kühlphase, die gewöhnlich den längsten Teil der gesamten Zykluszeit ausmacht und der Formprozess sind ein teurer und wichtiger Abschnitt in der Herstellung. Ein Absenken der Kaltwassertemperatur in der Form führt zwar zu einer kürzeren Zykluszeit, aber Temperaturen unter dem Taupunkt der Umgebungsluft verursachen Kondensation auf der Formoberfläche und stellen weitere Anforderungen an den Prozess.

2. Entstehung und Problematik von Kondensat auf Werkzeugen

2.1. Was ist der Taupunkt? Wieso und unter welchen Bedingungen kondensiert Feuchtigkeit?

Der Taupunkt, auch die Taupunkttemperatur, ist jene Temperatur eines feuchten Gasgemisches (bestehend in der Regel aus einer Mischung aus Wasserdampf und Sauerstoff), bei dem sich Kondensieren und Verdunsten des feuchten Bestandteils genau die Waage halten. Das Gas ist mit dem Dampf gerade gesättigt. Wird diese Temperatur in irgendeiner Form unterschritten, zum Beispiel an der Oberflächentemperatur eines Gegenstandes, dann kondensiert der Wasserdampf an dieser Oberfläche.

Unterhalb von diesem Taupunkt geht der gasförmige Aggregatzustand der Feuchtigkeit in der Luft in einen flüssigen über. Der Taupunkt der Luft setzt sich zusammen aus der Umgebungstemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit:

An jeder Oberfläche, die eine Temperatur von unter 16,5°C aufweist, kondensiert die Luftfeuchtigkeit und ändert seinen Aggregatzustand von gasförmig in flüssig.

- Zum Beispiel: 20°C bei 75 % relative Luftfeuchtigkeit = Taupunkt von 16,5°C
- Zum Beispiel: 30°C bei 60 % relative Luftfeuchtigkeit = Taupunkt von 21,4°C
- Zum Beispiel: 38°C bei 80 % relative Luftfeuchtigkeit = Taupunkt von 35,9°C

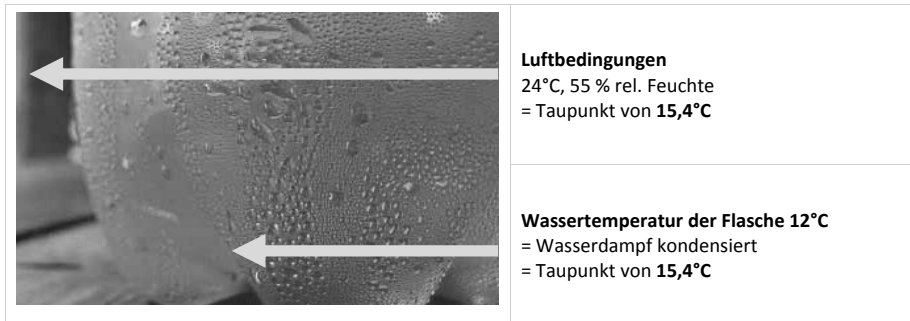


Bild 1: Kondensatbildung

2.2. Problematik bei der Produktion von Kunststoffteilen

Das Problem der Kondensation tritt speziell an den mit Kühlwasser gekühlten Formen von Kunststoffverarbeitungsmaschinen für das Spritzgießen, Extrusionsblasen oder Thermoforming auf. Die Kühlzeit, in den meisten Fällen der zeitlich längste Teil der Zykluszeit und des Formprozesses, ist ein teurer und wichtiger Bestandteil des Herstellungsprozesses. Durch die Reduzierung der Kühlwassertemperatur in der Form kann eine kürzere Zykluszeit erreicht und dadurch mehr produziert werden. Entsteht jedoch bei der Reduktion der Kühltemperatur Kondensat am Werkzeug, bringt dies mehrere Probleme mit sich, wie beispielsweise:

- Schlechte, minderwertige Produktqualität in Form von Wassermarkierungen
- Bzw. keine Produktion möglich, weil mechanische Abläufe nicht mehr möglich sind (PET: Kühlhülsen saugen sich fest)
- Korrosion an Werkzeug-Formen

3. Möglichkeiten zur Vermeidung von Kondensation am Werkzeug

3.1. Erhöhung der Oberflächentemperatur über die Taupunkt-Temperatur der Luft

In vielen Produktionsbetrieben in heißen und feuchten Klimazonen wird daher die Kühlwassertemperatur zur Kompensation angehoben, um eine Kondensatbildung zu vermeiden. Diese in der Praxis übliche Strategie hat einen entscheidenden Nachteil – die Effizienz wird durch die Effektivität eingeengt: Die Erhöhung der Kühlwassertemperatur verlängert die Kühlzeit, reduziert die Produktivität und vermindert den Ertrag (Faustformel dazu: 1°C Erhöhung der Wassertemperatur bedeutet ca. 2 % Produktionsrückgang). In vielen Fällen führt die lange Kühlzeit zu einer vermehrten Kristallisierung im geformten Kunststoff.

Ebenso führt das Kondenswasser am Werkzeug zu Wassermarkierungen (sogenannte „Orangenhaut“) am Produkt und somit zu einer minderwertigen Produktqualität.

- + kein Kondenswasser an der Form
- fortwährende Anpassungen, je nach Umgebungsbedingungen
- Längere Kühlzeiten, weniger Produktion, Maschine produziert nicht optimal

3.2 Senkung des Taupunkts der Umgebungsluft durch Trocknung der Luft

Damit die Kühlwassertemperatur des Werkzeugs nicht gesenkt werden muss, um die gewünschte und optimale Zykluszeiten der Produktionsmaschine fahren zu können, muss der Taupunkt der Luft um das Werkzeug reduziert werden, sprich der Prozentsatz der Feuchtigkeit der Luft wird herabgesenkt. Hierzu gibt es gängige Systeme die zum Entfeuchten von Werkzeugen, besonders bei Formprozessen in der Kunststoffindustrie, nützlich sind. Der Formenbereich der Produktionsmaschine wird von der Umgebungsluft abgeschottet und mit gefilterter, trockener Luft versorgt. Dies ermöglicht die ständige Verwendung von Kaltwasser mit einer Temperatur herab bis zu (optimal) 6°C, ohne dass sich dabei Kondensation auf der Formoberfläche bildet.

- + kein Kondenswasser an der Form
- + Unabhängig von Umgebungsbedingungen, konstante Produktionsbedingungen
- + Optimale Zykluszeiten können gefahren werden
- Investition in Maschine und Energie

3.3 Vermeidung von Kondensat durch Klimaanlage

Ingenieure gehen davon aus, dass das Problem von schwitzenden Formen mit Hilfe von Klimaanlage beseitigt werden kann. Das Klimatisieren von Produktionshallen hilft zwar in gewissen Maßen, löst das Problem aber nicht vollständig. Ein Nachteil liegt in den Anschaffungs- und Betriebskosten für ein Klimatisierungssystem passender Größe, die erst offensichtlich werden, wenn man den Energiehaushalt einer Produktionshalle in der Kunststoffindustrie näher betrachtet. Der größte Teil der Energie, der einer Produktionsstätte zugeführt wird, wird in Wärme umgewandelt. Ein Prozentsatz dieser Wärme wird über das Formenkühlwasser und über andere Wasserkühlsysteme – wie Hydraulik-Flüssigkeitskühlung – aus der Produktionshalle abgeführt. Die verbleibende Energie wird in Form von Wärme an die Luft abgegeben. Das Klimatisierungssystem muss daher in der Lage sein, die abgestrahlte Wärme abzuleiten und ein Auskondensieren der Luft in der Halle zu unterbinden. Klimaanlage

gen können die Arbeitskraft für das Arbeitsumfeld in Produktionshallen verbessern, vermindern aber den Gewinn durch hohe Betriebskosten.

Ein weiterer Nachteil ist, dass die Feuchtigkeit in einer klimatisierten Halle nicht wie gewünscht kontrolliert werden kann. Umgebungsluft vermischt sich bei jedem Öffnen eines Tors oder einer Tür mit der Luft der Produktionshalle. Feuchtigkeit dringt durch Betonwände und Betonböden in die Halle, wenn das Gebäude nicht mit einer entsprechenden Feuchtigkeitsbarriere versehen ist. Das Wechseln der Form an der Produktionsmaschine wird von Wasserausfluss an undichten Stellen begleitet. Das Säubern und Aufwischen der Böden sorgt ebenfalls für zusätzliche Feuchtigkeit in der Hallenluft.

3.4. Die optimale Kühltemperatur

Die Empfehlung lautet, reines Kaltwasser mit einer Temperatur möglichst nicht unter 6 °C zu verwenden. Bei darunter liegenden Temperaturen muss dem Wasser im Kühlkreis Frostschutz zugegeben werden, um ein Gefrieren im Verdampfer des Kühlers zu verhindern. Eine Zugabe von Frostschutz zum Kaltwasser hat aber seine Nachteile. Frostschutzmittel besitzen normalerweise eine niedrige thermische Leitfähigkeit, was zu einer schlechten Wärmeableitung aus dem Produkt über die Form führt. Eine Vielzahl dieser Mittel besitzt eine hohe Viskosität, was die Leistung der Wasserpumpe und den Wasserdurchsatz reduziert. Der Kaltwasserdurchsatz sollte hoch sein, um eine turbulente Wasserströmung in den Kühlkanälen der Form zu erzeugen.

Die beste Lösung ist die dauerhafte und kontrollierte Senkung des Taupunkts der Umgebungsluft um das Werkzeug.

4. Arten der Formentfeuchtung und deren Vor- und Nachteile

4.1. Kondensationstrocknung

- Luft wird über einen Luftkühler (Direktverdampfer eines Kältekreislaufs) derart gekühlt, dass durch Taupunktunterschreitung Wasserdampf auskondensiert und als Wasser abgeschieden werden kann.
- Anschließend wird die zuvor gekühlte Luft mittels Abwärme aus dem Wärmepumpenkreislauf durch den Kältemittelverflüssiger auf über Ansaugtemperaturzustand erwärmt (Abb. Kondensationstrocknung).

Bei der Kondensationstrocknung, wird die Luft mit Hilfe der Kondensation entfeuchtet. Eine kalte Oberfläche in einer Maschine wird hergestellt, sodass die feuchte Umgebungsluft an dieser Oberfläche kondensiert. Dieser Vorgang findet somit kontrolliert in der Kältemaschine statt und nicht direkt am Werkzeug der Produktionsmaschine. Angesaugte Umgebungsluft wird über einen Luftkühler (Direktverdampfer eines Kälte-kreislaufs) soweit gekühlt, dass Wasserdampf durch die Taupunktunterschreitung auskondensiert und als Wasser abgeschieden werden kann.

Bei extremen Umgebungskonditionen (ab 25°C, 70 % relative Feuchte) muss die Prozessluft mit einem Vorkühler (Wasser-Luft-Wärmetauscher) vorgekühlt bzw. getrocknet werden. Anschließend wird die zuvor gekühlte Luft mittels Abwärme aus dem Kältekreislauf durch den Kältemittelverflüssiger auf über Ansaugtemperaturzustand erwärmt.

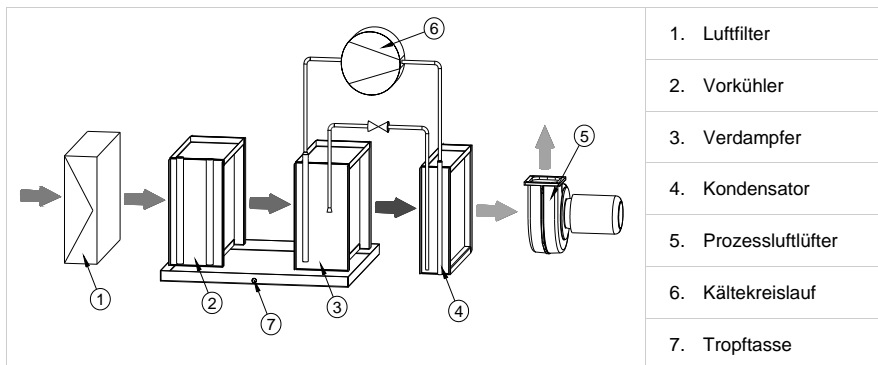


Bild 2: Kondensationstrocknung

Die erste Kühlstufe ist ein Luft-Wasser-Wärmetauscher (2). Das Kaltwasser des Vorkühlers mit niedriger Temperatur wird aus dem für die Werkzeugkühlung (der Produktionsmaschine) installierten Kühlwassersystem in den Wärmetauscher (2) gepumpt.

In der zweiten Stufe wird über den Verdampfer eines Kälteaggregats (einem Luft-Kältemittel-Tauscher) die Luft weiter bis zum gewünschten Taupunkt abgekühlt und dadurch entfeuchtet. Das anfallende Kondenswasser wird in einer Tropfasse (7) aufgefangen und kontrolliert abgeführt.

Abschließend wird die abgekühlte und entfeuchtete Prozessluft mit Hilfe des Kondensators (4) des Kältekreises (Luft-Kältemittel-Tauscher) erwärmt und der Produktionsmaschine zugeführt.

4.2. Adsorptionstrocknung

Jeder Adsorptionstrockner macht sich die physikalische Eigenschaft eines Trockenmittels zunutze, Wasserdampf bei einer hohen relativen Luftfeuchte aufzunehmen und diesen unter Einwirken einer dazu geringeren Luftfeuchte wieder abzugeben. Die im größeren Sektor vom Rotor aufgenommene Prozessluft-Feuchte wird durch die kontinuierliche Rotordrehung in einen beheizten Regenerationsbereich gebracht, wo die Austreibung des Wasserdampfes durch Warmluft im Gegenstrom erfolgt.

Abhängig von der Entfeuchtergröße und den Gegebenheiten vor Ort kommen dabei Elektro-, Dampf-, Heißwasser-, Gas- oder Abwärme als Heizmedien zur Anwendung. Die austretende Regenerationsluft muss als feuchte Abluft in der Regel nach außen geführt werden, da sie die gesamte entfernte Wassermenge der Prozessluft enthält. Die entstandene Trockenluft kann auf unterschiedlichste Weise für vielfältige Anwendungen genutzt werden. Die Temperaturerhöhung der ein- und austretenden Prozessluft liegt pro Gramm reduzierter absoluter Feuchte bei ungefähr 2,8 bis 3,5°C.

4.3. Große Nachteile bei beiden Technologien

Um die Umgebungsluft zu trocknen, muss bei beiden Verfahren viel Energie investiert werden. Beide benötigen große Mengen an Kühlwasser, um die notwendigen Prozessparameter zu erreichen (Vorkühlung der Prozessluft, Abkühlung des Adsorptionsrotors).

Das Adsorptionsverfahren benötigt (wie viel, in % zB) elektrische Energie für die Heizung und für das Gebläse, beim Kondensationsverfahren wird elektrische Energie für den Kältekompressor und für das Gebläse benötigt. Beim Absorptionsprinzip, wird kaltes Wasser für die Kühlung des Rotors verwendet (Wasser-Luft-Wärmetauscher) damit der Rotor wieder feuchte Luft aufnehmen kann.

Beim Kondensationsprinzip ist es notwendig, die Umgebungsluft vorzukühlen, ansonsten kann der Taupunkt bei schwierigen Umgebungsbedingungen nicht erreicht werden. Dann müsste die Kälteanlage viel größer ausgelegt werden.

Beide Verfahren müssen diesen Kraftakt für die Entfeuchtung der Luft vollführen, weil immer Umgebungsluft entfeuchtet werden muss.

5. Neue Technologien, Closed-Loop-Verfahren

Als energiesparende Alternative, wurde das Closed-Loop-Verfahren entwickelt und mit dem Kondensationsprinzip angewendet. Der Unterschied zu den anderen Varianten ist, dass nicht eine konstant heiße und feuchte Umgebungsluft entfeuchtet wird, sondern dass die Luft in einem geschlossenen Kreislauf das Werkzeug umströmt. Auf diese Weise ist kein hoher Energieaufwand zur Entfeuchtung der Luft notwendig, da die ins Gerät zurückströmende Luft bereits zum Teil trocken ist. Dieser Vorgang erlaubt den Entfall eines Vorkühlers (Chiller) und somit wird kein Kühlwasser für dieses Entfeuchtungssystem benötigt. Durch einen Kältemittelverdichter der neuesten (PWM) Technologie wird die benötigte Energie für das Khlssystem automatisch reduziert, sobald die Luft trockener wird. Es wird somit nur elektrische Leistung für das Khlssystem benötigt.

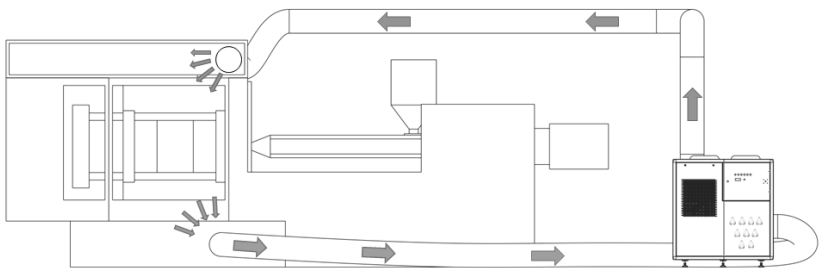


Bild 3: Closed-Loop-Verfahren

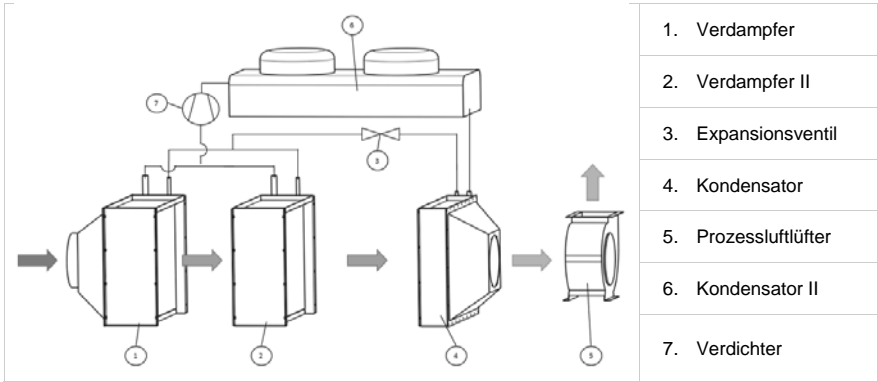


Bild 4: Funktionsschema

Der Entfeuchter saugt über die Rückluftleitung Luft aus dem Werkzeugraum der Maschine. Diese Luft wird über einen ersten Verdampfer (Luft-Kältemittel-Wärmetauscher) (1) abgekühlt und einem zweiten Verdampfer (2) zugeführt. Dieser kühlt im ersten Durchlauf die Prozessluft bis zu einer bestimmten Temperatur, in weiterer Folge dem Taupunkt. Die vorbereitete Prozessluft wird mit dem Kondensator (Luft-Kältemittel-Wärmetauscher) (4) erwärmt und über den Radiallüfter erneut dem Werkzeugraum zugeführt. Dieser Vorgang wird solange wiederholt, bis der gewünschte Taupunkt erreicht ist. Mit jedem Zyklus sinkt der Taupunkt der Prozessluft und auch der Energiebedarf für die Entfeuchtung.

5.1. Modellrechnung: Vergleich einer Werkzeugentfeuchtung mit nur 16 % Energieeinsatz gegenüber einer konventionellen Strategie

Marktgängig wird eine Entfeuchtungsanlage mit Vorkühlung (Chiller) angeboten. Beim Einsatz einer DMS-Entfeuchtungsanlage kann auf die Vorkühlung verzichtet werden, was eine oft 15.000 bis 20.000 EUR-Investition einspart. Dieser Vorkühler verbraucht, bei den Standard-Entfeuchtungsanlagen, ca. 66 % der benötigten Energie (Energieaufwand im Chiller). Durch den Wegfall dieses Vorkühlers, ergibt sich eine immense Kosten- und Energieeinsparung. Im laufenden Betrieb werden dann die Einsparungen augenfällig: Rechnet man beispielsweise eine gewünschte Kühlkapazität für eine Entfeuchtungsanlage mit 38.700 kcal/h (45 kW), so ergeben sich $45 / 3 = 15$ kW als notwendige elektrische Leistung für den Chiller. Für die Regenerationsheizung, Antrieb und Gebläse werden noch ca. 17 kW/h elektrische Energie kalkuliert. Der gesamte Stromverbrauch für den Betrieb der Entfeuchtungsanlage (Strom für Chiller inkludiert) beläuft sich pro Stunde dann auf 15 kW/h + 17 kW/h = 32 kW/h.

Dem steht ein erheblich reduzierter Verbrauch einer DMS-Entfeuchtungsanlage gegenüber: Die Closed Loop-Anlage benötigt im Vergleich nur 5 kW. Der Unterschied liegt folglich bei 25 kW/h oder um es klarer auszudrücken: Eine Closed Loop-Anlage verbraucht um ca. 84 % weniger Energie (5 kW gegenüber 32 kW). Ein gewaltiger Unterschied also. Kalkuliert man die Energiekosten mit z. B. 0,15 EUR/h, so ergibt sich in einer Woche bei einer „24/7-Produktion“ mit 168 Stunden Produktionszeit eine Ersparnis wie folgt: $25 \text{ kW} \times 0,15 \times 168 \text{ h} = 630$ EUR pro Woche, also 2.520,00 EUR pro Monat. Man spart Kosten, Tag für Tag, jeden Tag. Bei diesen Einsparpotenzialen wird schnell klar, dass sich eine DMS-Anlage sehr schnell amortisiert.

5.2. Vergleichstabelle der Formentfeuchtungsarten

Leistungsdaten / Vergleich			Adsorption	Kondensation Standard	Closed loop Kondensation wasserlos
Prozessluftmenge		m³/h	1.900	2.000	1.500
Elektrische Leistung	Ventilator, Motor	kW	16,8	1,0	1,0
Elektrische Leistung	Kälteanlage	kW	0,0	3,9	4,3
Elektrische Leistung	gesamt	kW	16,8	4,9	5,3
Kühlleistung		kcal/h	38.700	30.100	0,0
Elektrische Leistung für	Kaltwassersatz ¹	kW	15,0	11,6	0,0
Elektrische Leistung gesamt		kW	31,8	16,5	5,3

¹ Strombedarf für Kaltwassersatz: 2.600 kcal Kühlleistung = 1 kW elektrische Energie für Chiller

Annahmedaten: 35 °C und 60 % rel. Feuchte Umgebungsbedingungen

Die neue Generation der Saugblasmaschine

Dipl.-Ing. **M. Holbach**, Kautex Maschinenbau GmbH, Bonn

1. Markt des Saugblasformens

Anziehende Abgasgrenzwerte und CO₂-Ziele fordern die Automobilhersteller zunehmend zur Weiterentwicklung ihrer Motoren. Eine Möglichkeit bietet das Downsizing, bei dem sowohl Hubraum kleiner als auch Zylinderzahl geringer werden. Um wiederum gleiche Leistungen zu erreichen, werden die Motoren mit Turboladern aufgeladen. Neben der höheren Leistung verbessern sie auch die Güte und Effizienz der Verbrennung und ermöglichen somit die Einhaltung niedriger Abgasgrenzwerte.

Unterschiedlichen Quellen folgend wird sich der Anteil an aufgeladenen Motoren bis 2020 in Europa bis ca. 80% bewegen. In anderen Ländern wie Indien und Südkorea wird der Anteil bei ca. 45% liegen, allerdings von heute ausgehend mit zweistelligen Zuwachsraten.

Systembedingt benötigen turboaufgeladene Motoren typischerweise mehr als doppelt so viele Luftführungen wie Saugmotoren.

Blasgeformte Luftführungsrohre aus technischen Thermoplasten bieten gegenüber konventionellen Rohren aus Gummiwerkstoffen oder Aluminium Vorteile beim Gewicht, Herstellkosten und Freiheitsgrade im Design. Mit der fortschreitenden Entwicklung von Hochtemperaturmaterialien, die Dauertemperaturen von bis zu 220°C standhalten, ist der Markt für das Saugblasformen weiter gewachsen.

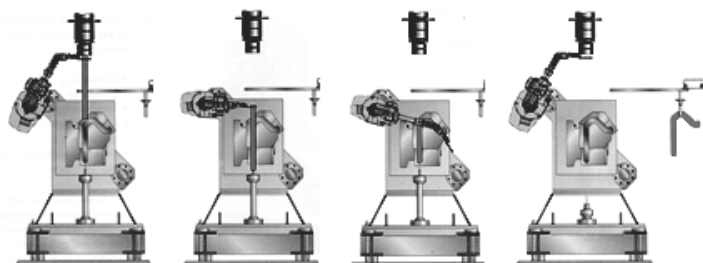
2. Technologien 3D-Blasformen

Für die Herstellung von Luftführungsteilen bieten sich für die unterschiedlichen Materialien und Geometrien folgende 3 Verfahren an:

- 3D-Blasformen mit Schlauchmanipulation
- Horizontales Blasformen
- Saugblasformen

2 Schlauchmanipulation

Schlauchmanipulation mit Roboter und geteilter Form



Die neue Saugblasmaschine



1 | 38

Kautex Maschinenbau GmbH · Kautexstrasse 24 · 22029 Bonn · Germany

www.kautex-group.com

15.03.2017

2 Horizontales 3D-Blasformen

1. Vertikales Form öffnen



3. Schlauch einlegen



4. Zurück fahren und Form schließen



2. Untere Form in Einlegeposition fahren



Die neue Saugblasmaschine



11 | 38

Kautex Maschinenbau GmbH · Kautexstrasse 24 · 22029 Bonn · Germany

www.kautex-group.com

15.03.2017

2 Saugblasformen

- Abfallarm
- Keine Schweißnaht
- Niedrige Schließkraft notwendig
- Einfaches Formwerkzeug
- Einlegeteile sind möglich
- Hohe Bandbreite an Materialien möglich



Die neue Saugblasmaschine



12 | 38

Kautex Maschinenbau GmbH - Kautexstraße 24 - 22029 Bonn - Germany

www.kautex-group.com

12.03.2017

2. Designrichtlinien Saugblasformen

Für die Herstellung von Luftführungsteilen im Saugblasformen sind vor dem Hintergrund eines breiten Prozessfensters und einer stabilen Produktion Designrichtlinien zu beachten. Diese sind aber nicht als absolute Grenze zu sehen. Vielmehr sollen diese bei einer Risikobewertung von neuen Artikeln unterstützen.

Folgende Kriterien werden hier angeführt:

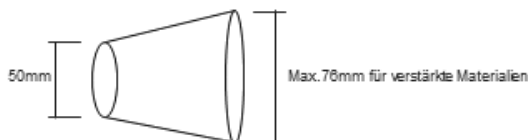
- Blow ratio
- Ovalitäten
- Bögen
- Faltenbälge
- Schweißflächen

3 Design-Richtlinien (1/5)

Blow ratio

Ist definiert als das Verstrecken vom Kunststoff während des Aufblasprozesses des Vorformlings

- Typische Werte
 - Unverstärkte Materialien (Ohne Glasfasern): 1:4
 - Verstärkte Materialien (Mit Glasfasern): 1:2
- Beispiel für ein Ladeluftrohr mit verstärktem Kunststoff
 - Durchmesser Vorformling $\sim 0,75 \cdot D$ Artikel
 - Anschluss A = 50mm \rightarrow max. Durchmesser für den Anschluss B ~ 76 mm



Die neue Saugblasmaschine

Kautex Maschinenbau GmbH · Kautexstraße 24 · 22029 Bonn · Germany



www.kautex-group.com

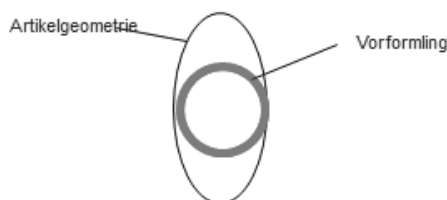
15.03.2017

3 Design-Richtlinien (2/5)

Ovale Segmente und Bereiche

Verhältnis zwischen der Haupt und der Nebenachse

- Vorsicht bei ovalen Bereichen mit einem Verhältnis von 1:2 insbesondere bei verstärkten Materialien, keine Reserve mehr für Bögen und/oder Schweißstellen



Die neue Saugblasmaschine

Kautex Maschinenbau GmbH · Kautexstraße 24 · 22029 Bonn · Germany



www.kautex-group.com

15.03.2017

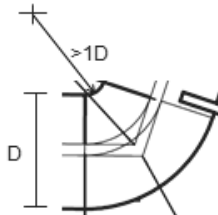
3 Design-Richtlinien (3/5)

Bögen

Durchmesser und Winkel von Bögen

Hohes Risiko bei

- Inneren Radien $< 1D$
- Winkel $> 90^\circ$ bei kleinen Radien
- Abstand zum Anschluss $< 0,5D$



Die neue Saugblasmaschine

Kautex Maschinenbau GmbH · Kautexstrasse 24 · 22029 Bonn · Germany



18 | 38

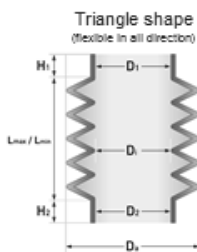
www.kautex-group.com

15.03.2017

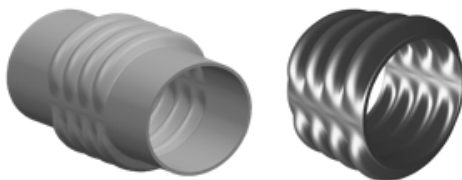
3 Design-Richtlinien (4/5)

Faltenbälge

Geometrie, Tiefe und Beweglichkeit



EMS MOAX® Solution



Die neue Saugblasmaschine

Kautex Maschinenbau GmbH · Kautexstrasse 24 · 22029 Bonn · Germany



19 | 38

www.kautex-group.com

15.03.2017

3 Design-Richtlinien (5/5)

Schweißflächen

Position, Wanddicke

- In vielen Fällen höhere Wanddicke gefordert
- Schweißstellen oft an äußeren Rändern vorgesehen
- Übergang in den Rohrbereich zu scharfkantig



Die neue Saugblasmaschine

Kautex Maschinenbau GmbH - Kautexstraße 24 - 22029 Bonn - Germany



20 | 38

www.kautex-group.com

12.03.2017

2. Die neue Saugblasmaschine

Die neue Saugblasmaschine wurde konsequent auf das Saugblasformen optimiert.

Gemäß einem Zitat von Antoine de Saint-Exupéry:

„Perfektion ist nicht dann erreicht, wenn es nichts mehr hinzu zu fügen gibt, sondern wenn man nichts mehr weglassen kann“

ist die neue KSB10 abgespeckt auf Komponenten, die zur Produktion wirklich gebraucht werden. Darüber hinaus wird auf den Einsatz besonders energieeffizienter Komponenten wie dem Sauggebläse und einer Servo-Hydraulik geachtet.

4 The idea

*"Perfection is achieved not when **there is nothing more to add**,
but when **there is nothing left to take away!**"*

Antoine de Saint-Exupéry

The new generation suction blow molding machine

- Dedicated and focused on the suction blow molding process
- Just good enough
- Still highest level of quality
- Well-conceived design
- Target price reduction by approx. 30% against the KBS20



Die neue Saugblasmaschine

Kautex Maschinenbau GmbH · Kautexstraße 24 · 22029 Bonn · Germany



22 | 38

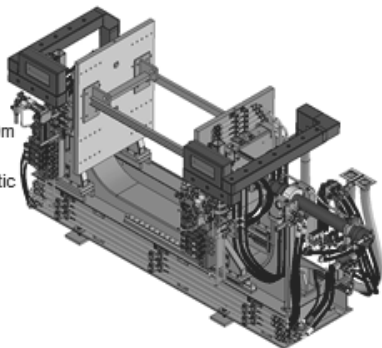
www.kautex-group.com

15.03.2017

4 The new machine in detail (1/8)

Clamping unit

- Only one movable platen
- Design as a C-frame
- Servo hydraulic drive
- Low height for process observation at 1,60m
- Mold dimensions matched to SB
- Basic equipment by 3 hydraulic, 3 pneumatic functions as well as 1 blow needle



Die neue Saugblasmaschine

Kautex Maschinenbau GmbH · Kautexstraße 24 · 22029 Bonn · Germany



24 | 38

www.kautex-group.com

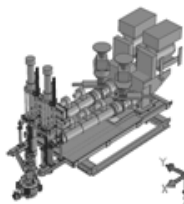
15.03.2017

4 The new machine in detail (3/8)

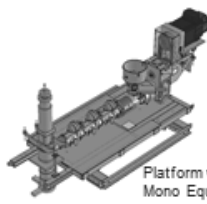
Extruder platform

- As simple as possible
- No need for being walkable for the Monolayer-Equipment
- New movement system/ driven by servo electrical motors
- Height adjustment by proven chain drive
- Positions are storable for safe restart
- Platform adjustment matched to SB
 - X-direction: +200/-400mm
 - Y-direction: +/-200mm
 - Z-direction: 500mm

Platform with
SeCo Equipment



Platform with
Mono Equipment



Die neue Saugblasmaschine

Kautex Maschinenbau GmbH · Kautexstrasse 24 · 22029 Bonn · Germany



25 | 38

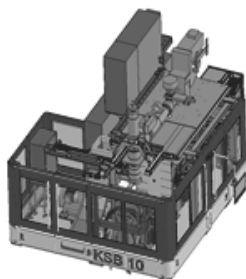
www.kautex-group.com

12.03.2017

4 The new machine in detail (4/8)

Extruder platform

- As an option comfort-platform is available for Monolayer equipment
- For the Seco-extrusion comfort platform is obligatory



Die neue Saugblasmaschine

Kautex Maschinenbau GmbH · Kautexstrasse 24 · 22029 Bonn · Germany



26 | 38

www.kautex-group.com

16.03.2017

4 The new machine in detail (6/8)

Control and operation

- BC 5 operation system based on Beckhoff
- 24" Multi-touch-screen
- Full HD resolution
- USB port
- Remote access via internet or phone
- As an option:
 - Mold code reading
 - Data capturing
 - Electrical energy consumption measuring
 - Article de-molding monitoring
 - Priority control for mold functions
 - Illumination of mold area



Die neue Saugblasmaschine

Kautex Maschinenbau GmbH - Kautexstrasse 24 - 22229 Bonn - Germany

www.kautex-group.com

16.03.2017

▶ 27 | 38

4 The new machine in detail (8/8)

Vacuum unit

Side channel blower:

Higher invest but low consumption

Venturi nozzle:

Low invest but high consumption (Compressed Air)



Side channel blower

Installed power:	9	kW
Energy:	1,8	kWh
Cost:	0,18	€/h



Venturi nozzle

Consumption:	83	NI/s
Air:	218.000	NI/h
Cost:	4,35	€/h



Die neue Saugblasmaschine

Kautex Maschinenbau GmbH - Kautexstrasse 24 - 22229 Bonn - Germany

www.kautex-group.com

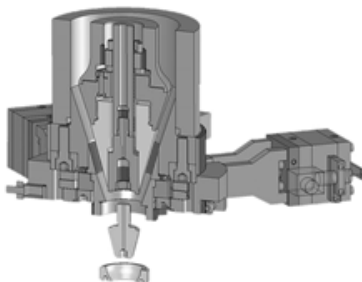
16.03.2017

▶ 28 | 38

4 Extruder and heads (4/4)

RWDS-system

- Consolidation for all heads
- Based on the RWDS 80
- Diameter 8...38mm inner
- High temperature designed
- Fast valve/cylinder combination
- Approved in several applications
- Quick change over
- Simple head toolings



Die neue Saugblasmaschine

Kautex Maschinenbau GmbH · Kautexstrasse 24 · 22029 Bonn · Germany



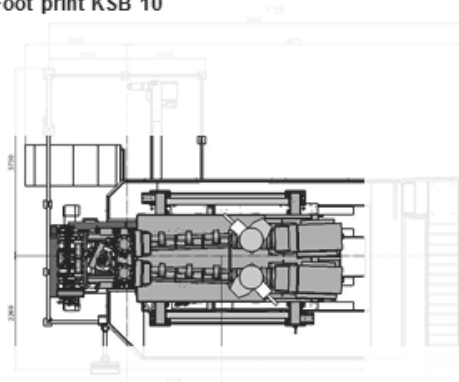
31 | 38

www.kautex-group.com

16.03.2017

4 Layout (2/3)

Foot print KSB 10



- Less footprint (50%) against the KBS20SB



Die neue Saugblasmaschine

Kautex Maschinenbau GmbH · Kautexstrasse 24 · 22029 Bonn · Germany



33 | 38

www.kautex-group.com

16.03.2017

Plasmaoberflächenveredelung für das Blasformen

Dr. rer. nat. **O. Kayser**, Dreistegen GmbH, Monschau

1. Kurzfassung

Moderne Werkzeugstähle für das Blasformen sollen gut zerspanbar und eine hohe Formstabilität aufweisen. Im Einsatz soll eine geringe Neigung zur Belägen, schnelle Farbwechsel ermöglichen. Weitere Forderungen sind eine hohe Beständigkeit gegen Verschleiß und Korrosion.

Die Oberflächenveredelung dient dem Ziel, die Haltbarkeit der Werkzeuge zu erhöhen und deren physikalisch/chemische Wechselwirkung mit Kunststoffen zu reduzieren. Plasmaunterstützte Verfahren erlauben die Veredelung bei reduzierten Temperaturen. Dadurch können Härteverluste vermieden und Maßänderungen reduziert werden.

2. Randschichthärten durch Plasmanitrieren

Wegen des allgemeinen Trends zu größeren Werkzeugen kommen sekundärhärtende Werkzeugstähle, wie sie bei Zerspanungs- und Umformwerkzeugen üblich sind, nicht zum Einsatz. Vergütungsstähle bieten dagegen den Vorteil, im vorvergüteten Zustand gut zerspannt werden zu können. Beim Vorvergüten werden die Stähle klassisch gehärtet und anschließend bei ca. 600°C das heißt auf eine Festigkeit/Härte von 1.100 N/mm²/33 HRC angelassen.

Tabelle 1: Kennwerte von Stählen nach dem Plasmanitrieren

Werkstoff DIN 17006	Werkstoff DIN 17007	Oberflächenhärte [HV 5]	Nitrierhärte tiefe [mm]	Verbindungsschicht [µm]	
16MnCr5	1.7131	600 - 750	0,7	4 - 8	Einsatzstahl
42CrMo4	1.7225	500 - 700	0,7	4 - 8	Vergütungsstahl
40CrMnMo7	1.2311	700 - 850	0,5	2 - 7	
34CrNiMo6	1.6582	500 - 700	0,7	4 - 8	
34CrAlMo5	1.8507	900 - 1.100	0,5	2 - 10	Nitrierstahl
31CrMoV9	1.8519	750 - 900	0,7	4 - 8	
34CrAlNi7	1.8550	900 - 1.100	0,7	1 - 10	
X38CrMo5	1.2343	900 - 1.200	0,3	2 - 7	Warmarbeitsstahl
X35CrMo17	1.2316	950 - 1.200	0,2	-	Rostbeständiger
X38CrMo16	1.4122	950 - 1.200	0,2	-	Stahl

Vorvergütete Werkzeuge sind nur unzureichend gegen abrasive Belastungen geschützt. Einen Ausweg bietet das Plasmanitrieren, mit dessen Hilfe Oberflächenhärten > 700 HV erzielt werden. Eine Weiterentwicklung der Vergütungsstähle stellen die Nitrierstähle dar. Sie sind gekennzeichnet durch einen erhöhten Chrom-, Molybdän- und Aluminiumgehalt und erreichen nach dem Nitrieren Oberflächenhärten von über 800 HV.

Eine Besonderheit des Plasmanitrierens besteht darin, daß auch hochlegierte Stähle nitriert werden können.

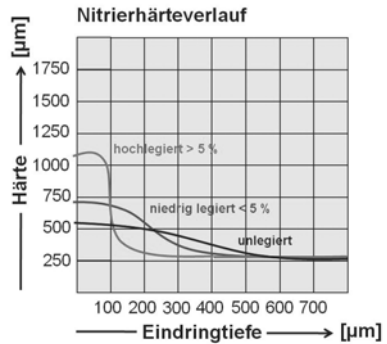
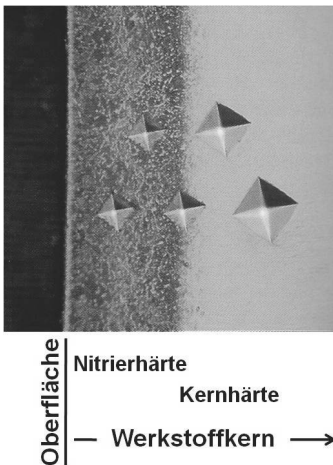


Bild 1: Nitrierhärtebestimmung nach Vickers (links)

Bild 2: Nitrierhärteverlauf für verschiedene



Beim Plasmanitrieren werden die zu behandelnden Oberflächen in einer Vakuumkammer elektrisch vorgespannt und in einem Stickstoff/Wasserstoff Glimmentladungsplasma aufgestickt. Durch den ständigen Ionenbeschuss werden natürliche Oxide des Chroms, Molybdäns, Titans, Vanadiums, Tantals und anderer Oxidbildner abgebaut, die ansonsten den Nitrierprozeß behindern. Für viele Anwendungen sind selbst die durch Nitrieren einstellbaren Oberflä-

chenhärten unzureichend. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn hohe Anteile von anorganischen Farbpigmenten wie Titandioxid zum Einsatz kommen. Diese lösen aufgrund ihrer hohen Härte von über 1.200 HV Mikrozerspanungsvorgänge im Schmelze führenden Bereich aus. In diesen Fällen ist es sinnvoll, zunächst nitrierte Oberflächen durch Hartstoffschichten mit Schichthärten über 2.000 HV zu veredeln. Hierzu stehen moderne Verfahren wie die physikalische Dampfabcheidung (PVD) und chemische Dampfabcheidung (CVD) zur Verfügung.

Die Nitrierrandschicht besteht aus einer Verbindungsschicht des Eisens mit Stickstoff und einer darunterliegenden Diffusionsschicht. In der Diffusionsschicht wird der eingelagerte Stickstoff beim Abkühlen in Form von feinen Eisennitriden ausgeschieden. Im Falle des Plasmanitrierens kann das Stickstoffangebot geringgehalten werden. Somit können spröde in sich abplatzende ϵ -Verbindungsschichten vermieden und zähe gut haftenden γ' -Verbindungsschichten bevorzugt werden. Letztere bieten eine gute Grundlage für nachfolgende Beschichtungen.

Das Ergebnis der Nitrierbehandlung ist stark vom Anteil von Legierungselementen im Werkzeugstahl abhängig. Mit steigendem Legierungselementgehalt (Cr, Mn, Ti, Mo, V, Al, Ta) ergeben sich höhere Oberflächenhärten von bis zu 1.200 HV. Dagegen sind hohe Legierungsanteile mit geringeren Nitrierhärte-tiefen verbunden. Während bei einem Legierungsanteil von 1 % noch Nitrierhärte-tiefen von bis zu 0,7 mm einstellbar sind, können ab einem Legierungsgehalt über 10 % kaum Nitrierhärte-tiefen größer 0,2 mm eingestellt werden (Bild 2).

3. Kaltnitrieren

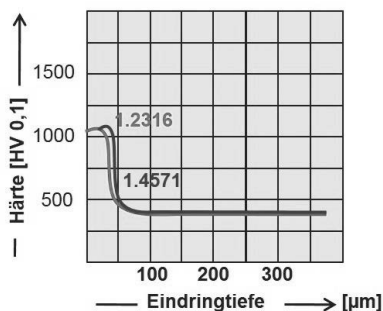


Bild 3: Nitrierhärteverlauf - Kaltnitrieren



Bild 4: Wendelverteiler, kaltnitriert

Im korrosiv beanspruchtem Umfeld der Extrusion werden häufig hochlegierte Werkzeugstähle wie der 1.2316 oder 1.4122 eingesetzt. Diese Werkstoffe bieten einen effektiven Korrosionsschutz weisen jedoch im vorvergüteten Zustand (30-33 HRC) einen unzureichenden Verschleißschutz auf. Das Plasmanitrieren im Glimmentladungsplasma bietet die Möglichkeit, den Stickstoff schon bei moderaten Temperaturen unterhalb 400°C in den Werkstoff einzulagern. Dabei wird die Umwandlung von Chrom zu CrN vermieden und der Korrosionsschutz bewahrt, so daß der gesamte Chromanteil für die Bildung einer natürlichen Oxidschicht zur Verfügung steht.

Ein weiterer Vorteil des Kaltnitrierens ergibt sich aus dem Ausgleich des elektrochemischen Potentials, so daß der bei hochlegierten Eisenmetallen insbesondere in der PVC-Verarbeitung auftretende Lochfraß vermieden werden kann.

Wegen der geringen Diffusionsgeschwindigkeit von Stickstoff in hochlegiertem Stahl bleibt das Kaltnitrieren auf einen Randbereich unterhalb von 50 µm beschränkt. Es stellen sich dafür vergleichsweise hohe Mikrohärten oberhalb 1.000 + 200 HV ein (Bild 3). Zudem ergeben sich aus der geringen Nitrierhärte tiefe vernachlässigbare Maßänderungen, so daß die Werkzeuge bereits vor dem Nitrierprozeß auf Maß geschliffen werden können (Bild 4).

4. PVD-Beschichtungen (Physical Vapor Deposition)

Die Technologie des physikalischen Aufdampfens (Physical Vapor Deposition) ermöglicht die Abscheidung einer Vielzahl metallischer Werkstoffe, indem diese im Vakuum verdampft werden. Industrielle PVD-Beschichtungen werden in der Regel in einer Reaktivgasatmosphäre aus Stickstoff-, Kohlenstoff- oder Sauerstoffhaltigen Gasen verdampft. Durch die Verbindung zwischen Metall und Reaktivgas können Beschichtungen mit hoher Härte über 2.000 HV abgeschieden werden.

Bekanntester Vertreter aus der Gruppe der PVD-Beschichtungen ist das goldfarbene TiN. Es ist gekennzeichnet durch eine hohe Oberflächenhärte (> 2.500 HV) und eine hohe Oxidationsbeständigkeit. Typische Schichtdicken liegen zwischen 2 und 10 Mikrometern.

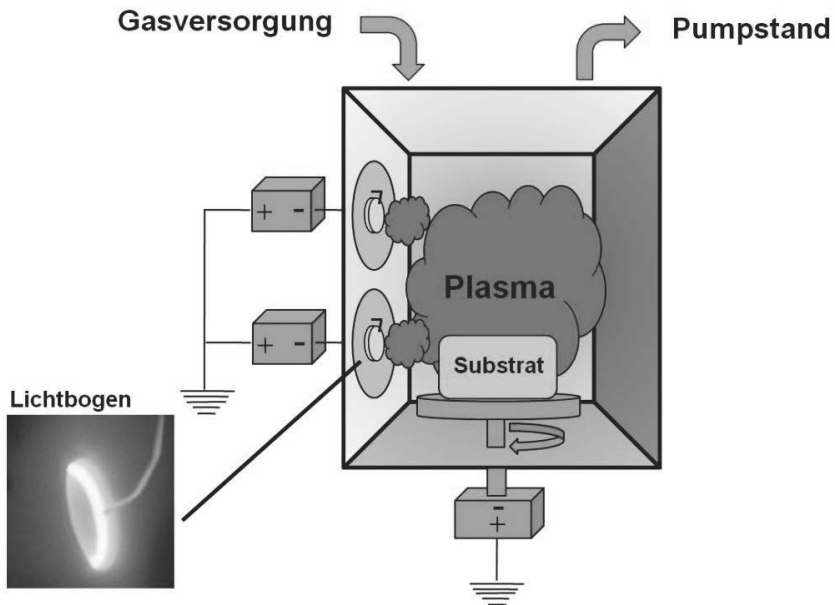


Bild 5: Schematischer Aufbau Lichtbogenverdampfen

Neben dem Schutz vor abrasivem Verschleiß wird auf Kunststoffverarbeitenden Oberflächen eine reaktionsträge Oberflächenchemie angestrebt. Ziel ist es, Zwischenbindungszustände zwischen Werkzeugoberfläche und dem Kunststoff zu vermeiden. Durch Zwischenbindungszustände werden innere Bindungen im Kunststoff geschwächt oder aufgelöst. In der Folge bilden sich Polymerfragmente, die auf der Werkzeugoberfläche anbinden und sich zu einem Werkzeugbelag aufbauen.

Eine reduzierte Neigung zu Werkzeugbelägen wird durch TiN-Beschichtungen insbesondere bei der Verarbeitung von PE, PC und PMMA beobachtet. So führt die Beschichtung von Schnecken und Rückstromsperrern zu einer reduzierten Stippen-Bildung. Im Falle der Verarbeitung von PA, ABS, HVOF oder PVC werden kaum positive Effekte durch TiN-Beschichtungen beobachtet.

Im Gegensatz hierzu sind Chromnitrid Beschichtungen gekennzeichnet durch eine Oberflächenhärte von 2.300 HV, die auch den chemischen Anforderungen der Kunststoffverarbeitung genügen. So zeigen CrN-Beschichtungen eine deutlich reduzierte Neigung zu Zwi-

schenbindungen mit polaren Kunststoffen. Im Falle der Verarbeitung von PP, PET, PA, ABS, HVOF und PVC haben sich daher CrN-Beschichtungen sehr gut bewährt. Eine zusätzliche Sauerstoff-Dotierung der CrN-Deckschichten sorgt für eine amorphe Struktur. Diese als ChromOx bezeichneten interferenzfarbene Schichten zeigen einen verbesserten Korrosionsschutz. Durch eine zusätzliche Hochglanzpolitur der Fließoberflächen kann die Anlagerung von Farbpigmenten deutlich verringert und das Farbwechselvermögen verbessert werden (Bilder 6-7).



Bild 6: ChromOx auf Mischer

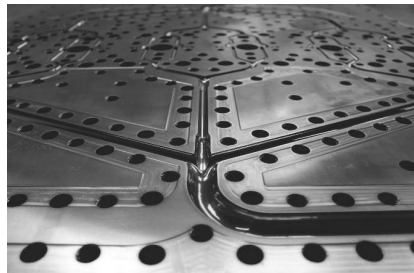


Bild 7: ChromOx beschichtete Fließplatte

Probleme treten häufig beim Wiederaufstart nach einem Maschinenstillstand auf. Vorgeschaltete Reinigungsvorgänge werden in der Regel mit einfachen mechanischen Mitteln wie Drahtbürsten und scharfen Gegenständen durchgeführt. Somit ist die Gefahr gegeben, die Werkzeuge durch die Reinigung zu beschädigen höher als im normalen Gebrauch.

Einen häufig ausgeführten Schutz bieten chemische (Nickel) oder galvanische Beschichtungen (Hartchrom). Sie können in Dicken von einigen zehn Mikrometern ausgeführt werden mit Schichthärten um 900 - 1.000 HV. Die hohen Schichtdicken bergen die Gefahr von Kantenverrundungen. Auch ist durch eine sorgfältige Vorreinigung sicher zu stellen, daß alle Voraussetzungen für eine gute Haftfestigkeit der Beschichtung erfüllt sind. Die vergleichsweise geringe Härte macht diese Naß-Beschichtungen leicht durch Mikroerspannungsvorgänge angreifbar, wie sie durch Hartpigmente wie TiO_2 oder SiO_2 – Fasern entstehen.

Die oben genannten ChromOx-Beschichtungen mit einer Härte von 2.300 HV genügen den Verschleißanforderungen und sorgen für eine reaktionsträge Oberflächenchemie. Da PVD-Beschichtungen wegen ihrer hohen Druckeigenspannungen nicht über 10 µm aufgetragen werden, muß das Trägermaterial bei Punkt- oder Linienbelastungen eine hohe Stützfestigkeit

für die PVD-Beschichtung aufweisen. Dies kann in effektiver Weise durch eine vorgeschaltete Plasmanitrierbehandlung erfolgen.

In der Praxis bietet die kombinierte Anwendung von Plasmanitrieren und ChromOx-Beschichtung einen effektiven Verschleißwiderstand sowohl für den Betrieb als auch für die sachgemäße mechanische Reinigung von Mehrschichtköpfen und Fließoberflächen. Dies gilt für die Verwendung von Vergütungsstählen als auch für den Einsatz von Werkzeugstählen.

5. CVD-Beschichtungen (Chemical Vapor Deposition)

Die Durchführung von Innenbeschichtungen auf Düsen, innenliegenden Kanälen oder Sieben ist mittels physikalischer Aufdampftechnik nicht ausführbar. In der Praxis gelingen physikalische Dampfabscheidungen wegen ihres geringen Beschichtungsdrucks nur in einer dem Bohrungsdurchmesser entsprechenden Tiefe.

Einen Ausweg bietet die chemische Dampfabscheidung. Dabei werden die schichtbildenden Spezies in Form von flüchtigen Verbindungen in die Beschichtungskammer geleitet, dort durch Diffusion gleichmäßig verteilt und auf der Werkzeugoberfläche abgeschieden.



Bild 8: Innenbeschichteter Verteiler

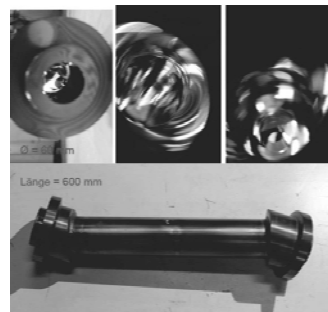


Bild 9: Verbindungsstück, D = 60 mm, L = 600 mm

Die chemische Dampfabscheidung ist bekannt von der TiN-Abscheidung aus TiCl_4 und N_2 . Diese auf Chlorverbindungen basierende Abscheidung erfordert hohe Wachstumstemperaturen über 1000°C , was bei herkömmlichen Werkzeug- und Vergütungsstählen eine nachgeschaltete Wärmebehandlung erfordert. Die daraus resultierenden Einschränkungen an Maßhaltigkeit und Härte hat die Verbreitung der CVD des TiN behindert. Zwar konnte durch plasmaunterstützte CVD die Beschichtungstemperatur auf ca. 500°C gesenkt werden, je-

doch zeigten die damit erzeugten TiN - Beschichtungen einen hohen Rest-Chloranteil, so daß sie zu intrinsischer Korrosion neigten.

Durch die Entwicklung neuartiger Ausgangsstoffe ist es nunmehr gelungen, sogenannte metallamorphe CVD-Beschichtungen deutlich unterhalb von 450°C durchzuführen. In Bild 8-9 ist ein entsprechend beschichteter Verteiler und ein Verbindungsstück abgebildet. Es deutlich zu sehen, daß der Innenbereich der Werkstücke gut beschichtet ist. Die metallamorphen Beschichtungen weisen eine Vielzahl von Eigenschaften auf, die für industrielle Anwendungen von herausragendem Interesse sind.

- Durch eine spezielle Prozeßführung kann die Ausbildung einer kristallinen Phase verhindert werden. Die somit eingestellte amorphe Struktur weist eine atomar glatte Oberfläche auf. Somit können Anhaftungen durch mechanische Mikroverkrallungsvorgänge vermieden werden. Aufgrund ihres amorphen Charakters werden die Schichten als Metallamorphe Beschichtungen bezeichnet.
- Die Schichten weisen durchweg eine hohe Oberflächenhärte von 1.800 HV auf und bieten somit einen guten Verschleißwiderstand.
- Wesentliches Merkmal ist ihre geringe Oberflächenenergie. Insbesondere besteht keine Neigung, polare Bindungen mit benetzenden Kunststoffen auszubilden.
- Durch die Abscheidung mittels chemischer Dampfabscheidung können auch Innenbeschichtungen realisiert werden. Somit sind auch innenliegende Fließkonturen für die Beschichtung zugänglich.

Praktische Anwendungen sind Düsen, Verteiler und Fließplatten. Diese konnten bislang nicht durch Hartstoffbeschichtungen geschützt werden. Die neuartige CVD-Beschichtungstechnik erlaubt nunmehr, die Innenbeschichtung von Schmelze führenden Oberflächen in der Extrusion. Auch können Siebplatten und Siebkörbe allseitig mit einer reaktionsträgen/verschleißschützenden Hartstoffschicht geschützt werden.

Zusammenfassung:

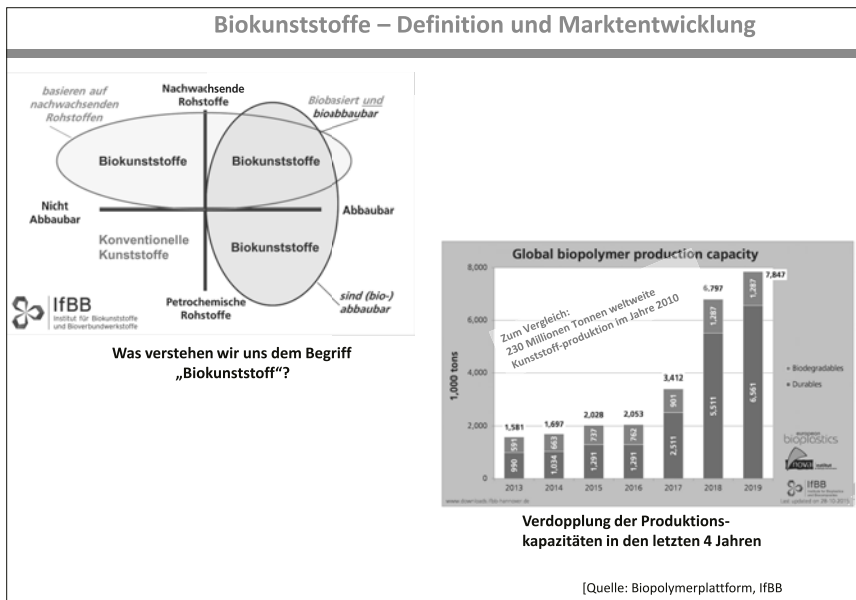
Moderne Plasmabehandlungen sind ein hervorragendes Hilfsmittel abrasiven Verschleiß, Korrosion und unerwünschte Beläge zu vermeiden. Optimale Eigenschaften ergeben sich durch die kombinierte Anwendung von Plasmanitrierbehandlung und Hartstoffbeschichtung.

Durch die Absenkung der Temperatur beim Plasmanitrierprozeß kann der Verlust der Korrosionsbeständigkeit beibehalten sowie Maßänderungen vermieden werden.

Insbesondere durch die Weiterentwicklung der Technik der chemischen Dampfabscheidung lassen sich nunmehr Innenbeschichtungen mit reaktionsträgen Hartstoffschichten realisieren. Somit eröffnen sich neue Anwendungen für moderne Hartstoffbeschichtungen auf Blasfolienwerkzeugen.

Verarbeitung von Biokunststoffen im Extrusionsblasformen im Rahmen des Verbundprojektes „Verarbeitung für Biokunststoffen“

Dr.-Ing. **O. Bruch**, Dipl.-Ing. **J. P. Hochstätter**, MBA **M. Stender**,
Dr. Reinold Hagen Stiftung, Bonn



Biokunststoffe – Eine kleine Auswahl



Thermoplastische Stärke (TPS)

- native Stärke + Glycerin + Sorbitol
- bis 2000 ca. 80% Marktanteil im Bereich der Biokunststoffe
 - reine TPS heute nur in Nischenanwendungen
 - Maßschneidung der TPS durch Verblendung /Compoundierung mit weiteren Kunststoffen



Foliengrundlage:
Dipl.-Ing. Sandra Nüchel, H-BRS

Polylactide (PLA)

- Ausgangsmonomer: Milchsäure
 - fermentativ gewonnen aus Stärke oder Zucker,
- Substitution von PET, Polyester und Polystyrol
- in Reinform hochtransparent
- Sehr hydrophil
- Gute Compoundierbarkeit
 - Einsatzbereich: Verpackungsindustrie, Medizin (orthopädische Nägel, Implantate)



Biokunststoffe – Eine kleine Auswahl

(Teil-)Biobasierte „konventionelle“ Thermoplaste → sog. Drop-In-Lösungen



„Vollständige Substitution petrochem. Rohstoffkomponenten durch biogene Rohstoffe“ (Endres, Siebert-Raths)

Beispiele:

Biobasiertes HD-PE (Fa. Braskem)

- Bioethanol auf Zuckerrohrbasis
- 100 % Bio, zertifiziert
- 2010: Kapazität von 200.000t
- Herstellbar in den gleichen Fabriken wie herkömmliches PE
- Verarbeitbar auf den gleichen Maschinen wie herkömmliches PE
- Bio-PP ist in der Entwicklung

Braskem



Coca Cola Plant-Bottle™

- PET, Ethylen-Glycol-Komponente biobasiert
- 30 % Bio (Molekulargewicht)

Blends

- PLA+ABS

Biokunststoffe im Extrusionsblasformen

Verpackungsanwendungen



PLA

Mineralwasser-Flaschen



Bio-PE

Kosmetikverpackung



Ecozen

Neue Flaschen-Materialien
Copolyester, 9-30 % biobasiert

Quellen: Plastics Today, Natürliche-Verpackungen.de, Bioplastics Magazin, SKEcozen



PET-Flasche, 100 % aus nachwachsenden Rohstoffen
Labor/Serie ?

Technische Anwendungen

Automobil → Rohrleitungen, Motorraum



Rilsan 11

Rohrleitungen aus 100% biobasiertem Polyamid (PA 11)



Luftfiltergehäuse aus PA 6.10, ca. 63% biobasiert, spritzgegossen



Rilsan HT

Flexible Rohrleitung aus PPA (Polyphthalamide)



Luftführung aus PA 6.6 (erdöl-basiert)

Quellen: Bioplastics Magazin, Arkema, Mann & Hummel, Plastics World

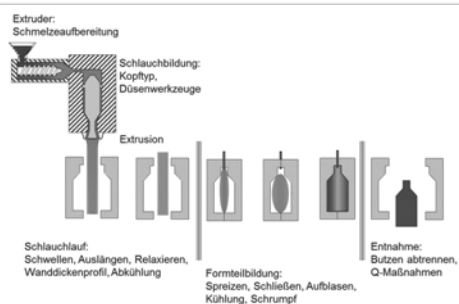
Der Blasformprozess

Grundsätzliche Prozessmerkmale und notwendige Werkstoffeigenschaften

- Schmelzestefigkeit (Dehnaviskosität)
- Schwellverhalten (Durchmesser, Wandstärke)
- Verschweißbarkeit
- Verarbeitungszeitfenster (mit oder ohne Speicherkopf)
- Hygroskopische Eigenschaften (mit oder ohne Trocknung)

Vorformling

- Rezyklierbarkeit
- Schwindung und Verzug / Kristallisationsverhalten
- Oberflächenqualität



Untersuchte Materialien

15 Biokunststofftypen untersucht

(davon viele Folien- oder Spritzgießtypen)

- PLA-Blends (Copolyester und PLA)
- Cellulose-Blend
- Polyamid 4.10-Typen
- Bioabbaubare Compounds (PBAT und PLA)
- Bio-PE auf Basis Zuckerrohr
- PLA-Typen
- TPS-Blends
- Bio-PE-Blend

Referenzmaterial: konventionelles HDPE (gut geeignet für Verpackungsartikel)

Vorgehensweise

1. Stufe

1. Vorversuche auf Kleinst-Blasmaschine
2. Extrusionsversuche auf Einschneckenextruder mit Kopfwerkzeug



- Aussagen zur **prinzipiellen Verarbeitbarkeit** im Extrusionsblasverfahren
- Hinweise auf **Verarbeitungsparameter** (Temperaturführung etc.)
- Auswahl von Materialien für weitergehende Untersuchungen

2. Stufe

3. Versuchsreihen auf einer industriellen Blasformmaschine

Untersuchung von:

Quetschnaht (Verschweißbarkeit/Quetschnahtfestigkeit)

Schwindung / Verzug

Oberflächenqualität

Rezyklierbarkeit



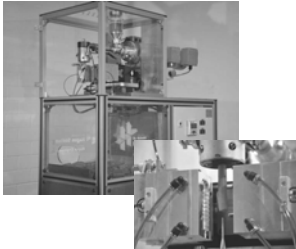
- Hinweise auf **Verarbeitungsparameter** für die Artikel-Produktion

4. Produktion von Verpackungsartikeln



Prinzipielle Verarbeitbarkeit im Blasformverfahren

Vorversuche auf Kleinst-Blasformmaschine



Kleinst-Blasformmaschine



Unterschiedliche Musterartikel

Zielsetzung / Methodik

- Teileproduktion auf Kleinst-Blasformmaschine
- Untersuchung der grundsätzlichen Blasformfähigkeit mit kleinen Materialmengen (ca. 1kg)
- Erste Aussagen zur
 - Schlauchbildung
 - Schwellen
 - Auslängen
 - Oberflächenqualität von Schlauch und Artikel
 - Prozessfenster / Verarbeitungstemperatur
 - Generelle Blasformfähigkeit

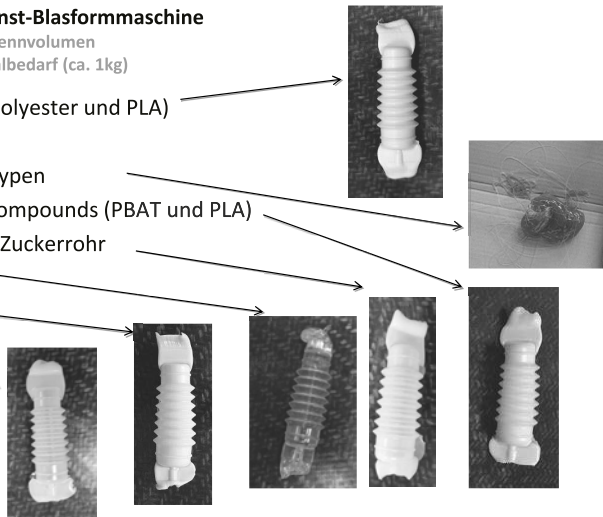
Prinzipielle Verarbeitbarkeit im Blasformverfahren

Vorversuche auf Kleinst-Blasformmaschine

Artikelgröße bis 25 ml Nennvolumen

Vorteil: geringer Materialbedarf (ca. 1kg)

- PLA-Blends (Copolyester und PLA)
- Cellulose-Blend
- Polyamid 4.10-Typen
- Bioabbaubare Compounds (PBAT und PLA)
- Bio-PE auf Basis Zuckerrohr
- PLA-Typen
- TPS-Blends
- Bio-PE-Blend



Prinzipielle Verarbeitbarkeit im Blasformverfahren

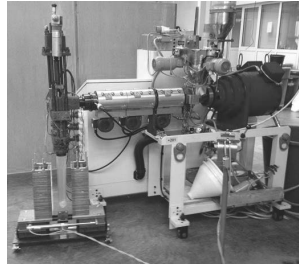
Extrusionsversuche und Schmelzestufigkeit

Zielsetzung / Methodik

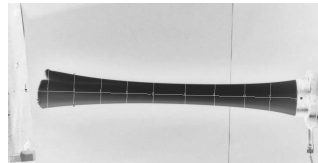
- Verarbeitungstemperaturfenster
 - Masstemperatur
 - Massedruck
 - Temperaturprofil in Extruder, Umlenkung und Blaskopf
- MVI-Wert bei Verarbeitungstemperatur
 - getrocknet / ungetrocknet
- Optische Vermessung der VF-Geometrie sowie Bestimmung der Massenverteilung (Segmentierwerkzeug)
 - Erfassung Schwell- / Auslängverhalten
 - „Faktor-Blasform-Fähigkeit“:

$$FBF = D_{Düse} / D_{Schlauch_min}$$
 - „Schwellfaktor (Wandstärke)“

$$m_{Segment(min)} / m_{Segment(max)}$$



Extruder mit Blaskopf und Segmentierwerkzeug



Optische Erfassung der VF-Durchmessers

Prinzipielle Verarbeitbarkeit im Blasformverfahren

Bio-PE



gut geeignet $FBF = 0,98$

PLA-Blend



geeignet $FBF = 0,62$

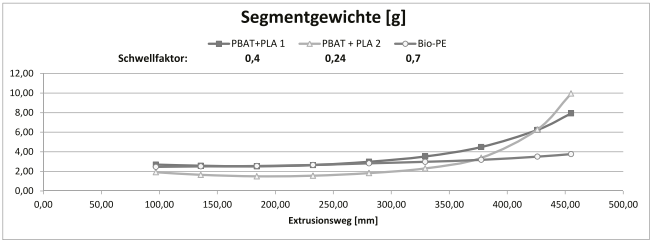
TPS-Blend Thermoplastische Stärke



Wenig geeignet $FBF = 0,22$

Auslängverhalten

Prinzipielle Verarbeitbarkeit im Blasformverfahren



Massenverteilung über Länge und Schwellfaktor:
Vergleich zweier „PBAT + PLA“-Blends (Folientyp) mit einem Polyethylen



„PBAT + PLA 2“ zeigt ein deutliches (Wanddicken-)Schwellen in Verbindung mit einem dünner werden aufgrund des Eigengewichts.
Die Wanddickenunterschiede sind durch die maschinelle Wanddickensteuerung nicht mehr auszugleichen; das Material ist daher nur bedingt blasformgeeignet.

















Prinzipielle Verarbeitbarkeit im Blasformverfahren




		PLA-Blend	PBAT + PLA	PBAT + PLA	Bio-PE	Bio-PE - Compound	
PBF (Faktor Blasform Fähigkeit)		0,62	0,41	0,59	0,98	0,72	
Schwellfaktor (Wanddicke)		0,42	0,4	0,24*	0,7	0,57	
Einschnüren?		leicht	ja	ja	nein	ja	
	*starkes Wanddickenquellen						
MVI							
	ungetrocknet	cm³/10min	1,74	0,92	1,4	1,45	1,78
	getrocknet	cm³/10min	0,93	0,55	1,062		1,63
	Prüftemperatur		170	170	170	190	170
	Belastungsgewicht	kg	2,16	2,16	2,16	5	2,16
Verarbeitungstemperaturen / Temperaturprofil (Extrusionsversuche)							
Temperatur Einzugszone	°C	145	160	145	140	140	
Temperatur Zone 1	°C	175	170	170	195	155	
Temperatur Zone 2	°C	170	165	165	190	150	
Temperatur Zone 3	°C	165	160	160	185	150	
Temperatur Flansch	°C	170	165	165	190	155	
Temperatur Umlenkung	°C	170	165	165	190	155	
Temperatur Kopf	°C	170	165	165	190	155	
Massetemperatur	°C	176	181	178	212	153	

Verarbeitungsparameter / Kennzahlen Screening-Versuche (Auswahl)

Ergebnis der Voruntersuchungen

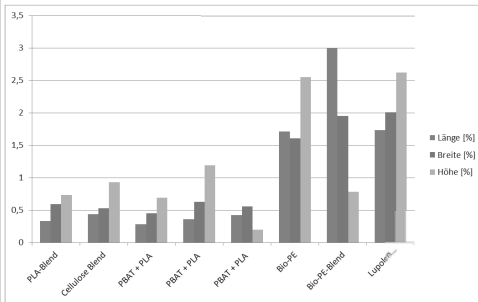
Prinzipielle Verarbeitbarkeit / Vorformlingsbildung

	Schwellverhalten ¹	Auslängverhalten ²
• PLA-Blends		
• Cellulose-Blend		
• Polyamid 4.10-Typen		
1 von 3 nicht geeignet • PBAT und PLA		
• Bio-PE		
• PLA-Typen		
1 von 4 nicht geeignet • TPS-Blends		
• Bio-PE-Blend		

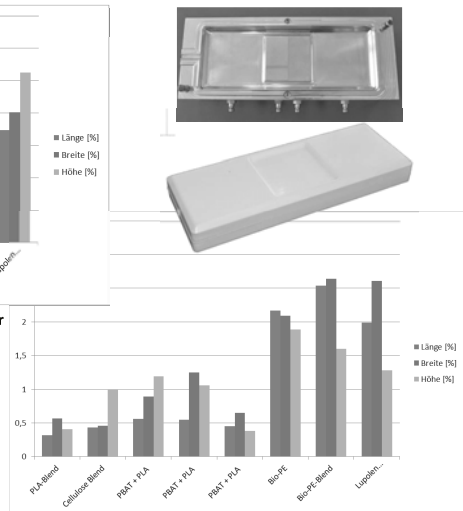
 „Material gut geeignet“
 „Material geeignet (mit Einschränkung)“
 „Material ungeeignet“

¹ Wanddicken- und Durchmesserschwellen, Wanddickenverteilung
² Ausläng- bzw. Einschnürverhalten

Schwindung

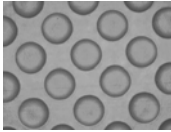


Materialschwindung in % bei 15 °C Formtemperatur



Materialschwindung in % bei 60 °C Formtemperatur

Oberflächenqualität

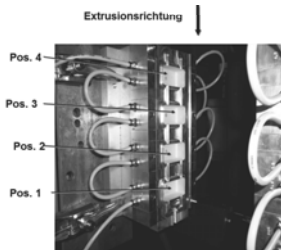


Oberflächenstruktur (Kreismuster)

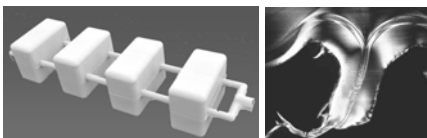
		Material							
		PLA Blend		Cellulose Blend		PBAT + PLA		BioPE-Blend	
gesandstrahlt oder poliert	Kriterium	Formt. 15 C°	Formt. 60 C°	Formt. 15 C°	Formt. 60 C°	Formt. 15 C°	Formt. 60 C°	Formt. 15 C°	Formt. 60 C°
	Gut sichtbar		x				x		
	Schlecht sichtbar	x				x			
Frässtruktur sichtbar	Nicht sichtbar			x	x			x	x
	Gut sichtbar		x						
	Schlecht sichtbar						x		
Abbildungsqualität Kreismuster	Nicht sichtbar	x		x	x	x		x	x
	Sehr gut								
	Gut		x			x	x		
Abbildungsqualität Kreismuster	Mittel	x			x			x	x
	Schlecht			x					

Abbildequalität / Oberflächengüte für ausgewählte Materialien

Weitere Untersuchungen → Quetschnahtbildung



Versuchswerkzeug Quetschnahtbildung



Zielsetzung / Methodik

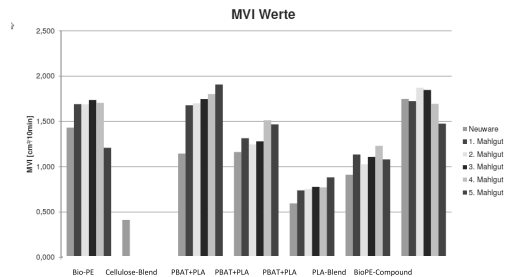
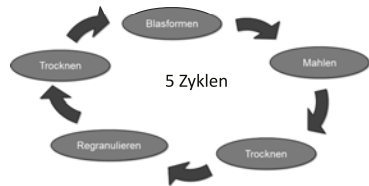
- Einfluss der von Verfahrensparametern auf die Quetschnahtfestigkeit
- Teileproduktion mit wechselnden Verfahrensparametern
 - Werkzeugtemperatur 15°C und 60°C
 - Angepasste Schließbewegung
- Bewertung der Quetschnahnt
 - Optische Analyse der Quetschnahngeometrie (Mikrotromschnitte)
 - Prüfungen an aus dem Artikel entnommenen Probekörpern
 - Zugprüfung
 - Schlagzugversuch

Weitere Untersuchungen → Rezyklierbarkeit

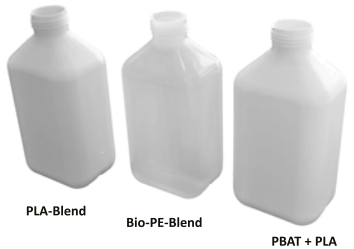
Rezyklierbarkeit

Untersuchung des Einflusses mehrfacher Rezyklierung auf Verarbeitungseigenschaften und mechanisches Produktverhalten:

- Schmelzsteifigkeit
- Mechanische Prüfungen
 - Kurzzeit-Innendruck
 - Stauchversuch
 - Fallprüfung



Serienproduktion und Bauteilprüfungen



Vierkantflasche auf verschiedenen Biokunststoffen



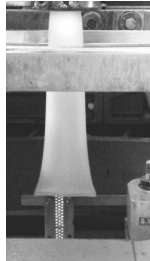
Griffflasche 1,5l aus Bio-PE



Ölflasche aus Biokunststoff (Bio-PE)
(gefüllt mit Bioschmieröl)

Serienproduktion und Bauteilprüfungen

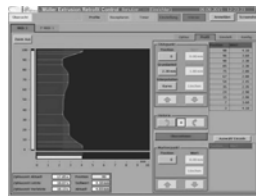
Griffflasche 1,5l aus Bio-PE Krupp-Kautex KEB4, kontinuierliche Extrusion oder Speicherkopf, Artikelgröße 0,5 bis 5 l



Temperaturführung:

Extruder Einzug	70°C
Extruder Zone 1	200°C
Extruder Zone 2	195°C
Extruder Zone 3	190°C
Kopfzone 1 - 3	200°C

Axiale Wanddickensteuerung:



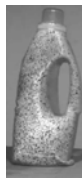
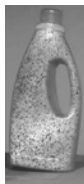
Zykluszeit: 18 Sekunden
Blaszeit: 13 Sek. (8 bar)

Speicherkopf: nein
Schlauschließenrichtung
Stützluft

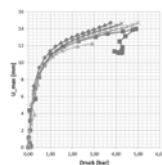
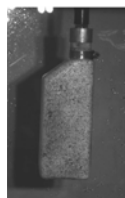
Artikelgewicht: 80 g brutto
Artikelgewicht: 65 g netto

Serienproduktion und Bauteilprüfungen

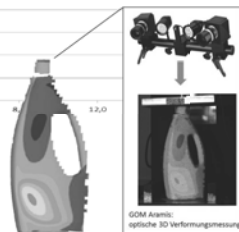
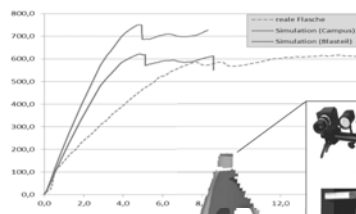
Produktprüfungen



Fallprüfung



Innendruckprüfung



Aramis Messung

(Zeitpunkt: maximale Stauchlast)

Stauchprüfung

Zusammenfassung der Ergebnisse

		PLA-Blend	Cellulose Blend	PA 4.10	PBAT + PLA	BioPE	BioPE - Compound	TPS-Blend
Vorformlingsbildung								
Artikelproduktion								noch nicht untersucht
Verarbeitungsparameter Extrusionsversuche								
Temperatur Einzugszone	°C	145	145	200	145	140	140	160
Temperaturverlauf Extruder	°C	175-170	215-200	270-260	170-165	195-190	150-155	165-155
Temperatur Kopf	°C	170	200	260	165	190	155	155
Materialtrocknung		ja	ja	ja	ja	nein	empfehlensw.	ja
Bauteilschwindung (gemittelt)	%	0,46	0,49	0,5	0,49	1,66	2,5	-
Länge/Breite; Werkzeugtemperatur 15°C								
Bemerkungen	Alle Angaben beziehen sich auf einen spezifischen Materialtyp.		Artikel sehr hart und spröde		starkes Wanddickenquellen			Blasformfähigkeit abhängig vom Mat. Typ
<div><div></div> „Material geeignet“ <div></div> „Material mit Einschränkung geeignet“ Einsatz eines Speicherkopfes notwendig <div></div> „Material ungeeignet“</div>								

Fazit

- Auch im Blasformen sind grundsätzlich für viele Anwendungsbereiche (teil-) biobasierte und/oder biologisch abbaubare Werkstoffe verfügbar.
- Viele Werkstoffe wurden für andere Verfahren ((Folien-)Extrusion, Spritzgießen, etc.) entwickelt:
 - Eine Anpassung an prozessspezifische Besonderheiten muss in vielen Fällen erst noch erfolgen, z.B.
 - Schmelzestabilität
 - Schwellverhalten
 - Schlagzähigkeit
- Eine Verarbeitung auf Standardblasformmaschinen ist in den meisten Fällen ohne große Anpassungen möglich
 - Durch spezielle Anpassungen (Schnecken, Mischteil, Schlauchkopf) kann im zweiten Schritt die Leistung erhöht werden
- Biokunststoffe sind normale Kunststoffe
 - Es ist der gleiche Aufwand wie beim Einsatz eines neuen konventionellen Materials notwendig.



Marktanwendungen

Quellen: Apinatbio.com, Bioplastics Magazin, innovationonline.eu, SKCcozen,

Blasformteile mit neuartiger Schaumstruktur

Physikalisches Schäumen mit expandierbaren Mikrosphären

Dipl.-Ing. (FH) **C.-O. Danz**, Dr. **K.-C. Danz**, kcd Kunststoffe,
Additive und Beratung GmbH, Weimar

Kurzfassung

Geschäumte Kunststoffteile können aus vielerlei Hinsicht gegenüber kompakten Teilen vorteilhaft sein. Die Herstellung solcher Teile ist je nach Verfahren und den gestellten Ansprüchen an das Endprodukt oft anspruchsvoll. Prozessbedingt stellen geschäumte Blasformteile dabei eine besondere Problemstellung dar, welche durch den Einsatz von expandierbaren Mikrosphären gelöst werden kann.

Es wird der Aufbau und das Wirkprinzip von expandierbaren Mikrosphären (Mikrohohlkugeln) beschrieben und auf die zahlreichen Typenvariationen solcher Mikrosphären eingegangen. Die Auswirkungen der verschiedenen Varianten und ihre Eigenschaften als physikalische Schäummittel werden dargestellt. Der Schäumprozess von Blasformteilen und die resultierenden neuartigen Schaumstrukturen in der Anwendung werden beschrieben und die besonderen Möglichkeiten und Herausforderungen bei geschäumten Blasformanwendungen werden erläutert.

Abstract

Foamed plastic parts can be advantageous in many respects in comparison to compact parts. The production of such parts is often demanding, depending on the method and the requirements set out in the final product. As a result of the involved processes, foamed blow molded parts represent a particular challenge, which can be solved by the use of expandable microspheres.

The structure and active principle of expandable microspheres (microhollow spheres) is described and the numerous types of such microspheres are discussed and how their properties affect their uses as physical foaming agents. The foaming process of blow molded parts and the resulting novel foam structures in the application are described, and the particular possibilities and challenges in foamed blow molding applications will be explained.

1. Geschäumte Blasformteile

Bei Anwendungen mit thermoplastischen Kunststoffen können Schaumstrukturen gegenüber kompakten Teilen oftmals viele Vorteile bieten und sind dementsprechend sowohl seitens des Herstellers als auch aus Sicht des Endverbrauchers in vielen Anwendungsfällen wünschenswert. Neben Gewichts-, und damit Material- und potentiell Kosteneinsparungen, können geschäumte Kunststoffteile auch anderweitig in ihren Eigenschaften modifiziert sein. Schaumstrukturen können zu Veränderungen in Verformbarkeit, Rückstellverhalten und Steifigkeit führen, aber auch das Klangverhalten und die Wärmeleitfähigkeit beeinflussen. Schäumen kann zudem veränderte Oberflächeneigenschaften bewirken, z.B. eine bestimmte Haptik erzeugen. Im Herstellungsprozess bedeutet ein leichteres Gewicht auch eine reduzierte Wärmekapazität der Teile und diese benötigen somit weniger Abkühlung, was wiederum zu reduzierten Zykluszeiten führen kann.

Geschäumte Blasformteile sind aktuell nur sehr vereinzelt im Markt anzutreffen und mit bisherigen Verfahren mit hohem technischen Aufwand und Investitionskosten verbunden. Unter Anwendung von Co-Extrusionsverfahren werden 3-Schicht-Systeme blasgeformt, bei denen die eingeschlossene mittlere Schicht mittels Direktbegasung geschäumt wird. An Bestandsanlagen ohne Co-Extrusion und Equipment für Direktbegasung kann bisher somit nicht geschäumt werden. In der Literatur wird bei diesen Verfahren eine Einsparung an „Kunststoffverbrauch und Gewicht um bis zu 15 %“ angegeben [1].

Wie im Folgenden aufgezeigt werden soll, hat die Verwendung von Mikrosphären beim Blasformen das Potential, an Bestandsanlagen ohne zusätzliche Maschinenteknik vergleichbare oder höhere Einsparungen an Gewicht zu bewirken.

2. Aufbau und Wirkprinzip von expandierbaren Mikrosphären

Die expansionsfähigen Mikroholzkugeln, die die Ausbildung von Schaumstrukturen in Kunststoffen und anderen Werkstoffen (z.B. Papier, Beschichtungen, Nonwovens, technische Textilien) ermöglichen, bestehen im Ausgangszustand aus Polyacrylnitril(PAN)-Copolymer-Hüllen, die niedrig siedende Alkane umschließen. Der Einschluß der später als Expansionsmedium wirkenden niedrig siedenden Flüssigkeiten erfolgt in einem speziellen Herstellungsverfahren bei der Polymerisation. Als Resultate liegen Hohlkugeln mit Durchmessern kleiner ca. 20 µm vor, die sich, je nach Typ, in der Größe der Sphären, dem Gehalt an niedrig siedenden Alkanen (Polymer-Lösemittel-Verhältnis) und der Art der eingeschlossenen Alkane (Länge der Kohlenstoff-Kette und damit Höhe der Siedetemperatur) unterscheiden.

Unter Wärmeeinwirkung werden die PAN-Hüllen dehnfähig, behalten ihre hohe Diffusionsstabilität gegenüber den aliphatischen Lösemitteln jedoch bei. Bei Überschreitung der Siede-

punkte der eingeschlossenen Alkane und nach Zufuhr der Verdampfungsenthalpie dehnen sich die Mikrosphären bis mehr als zum 40-fachen des Ausgangsvolumens aus (siehe Bild 1).

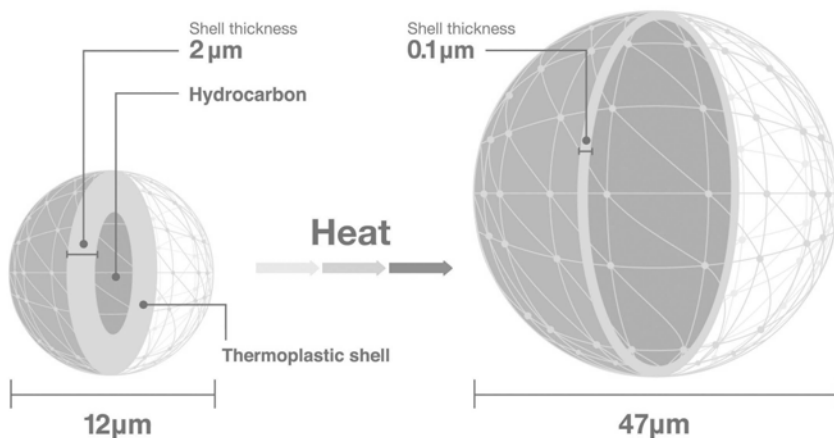


Bild 1: Schematische Darstellung einer mit Alkan-Abmischung gefüllter Mikrosphäre im unexpandierten Zustand und nach Hitzeeinwirkung im expandierten Zustand (Quelle: www.akzonobel.com)

Dabei entsteht ein 3-Phasen-System aus Treibgasen, den dehnfähigen diffusionsfesten Zellhüllen und der umgebenden Schmelze. Dies stellt einen wesentlichen Unterschied zu den üblichen Schaumsystemen dar, welche 2-Phasen-Systeme aus Treibgasen und Polymer-schmelzen ausbilden. Bei diesen Systemen bestimmt die Diffusionsbeständigkeit der umgebenden Polymerschmelze gegenüber den eingesetzten Treibgasen zu einem ganz wesentlichen Anteil das erreichbare Schäumergebnis. Aufgrund der diffusionsbeständigen Zellhüllen der Mikrosphären spielt die Permeabilität der umgebenden Schmelze beim Schäumen mit 3-Phasen-System hingegen keine Rolle. Die Dicken der Hüllen werden bei der Expansion um ein Vielfaches entsprechend dünner. Sie betragen dann ca. 100 Nanometer und sind gegenüber mechanischen Beanspruchungen empfindlich; auch schon in der Phase der Expansion. Der vorzeitigen Expansion in Verarbeitungsprozessen kann durch die Prozessführung entgegengewirkt werden, in dem für ausreichend hohen Umgebungsdruck gesorgt wird. Bild 2 zeigt expandierte Mikrosphären ohne eine umgebende Polymerschmelze.

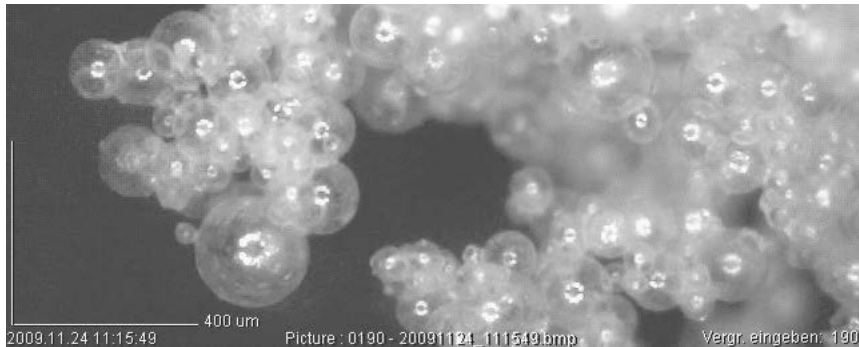


Bild 2: Mikroskop-Aufnahme von expandierten Mikrosphären

Lässt man die Mikrosphären in Kunststoffschmelzen expandieren, so verhalten sie sich wie unter Temperatureinwirkung expandierende Füllstoffe. Das Schäumen basiert auf rein physikalischen Prozessen. Das Aufschäumen von Kunststoffen mit Mikrosphären ist daher den physikalischen Schäumverfahren zuzuordnen. Das Schäumvermögen eines Masterbatches mit Mikrosphären ist in Bild 3 beispielhaft dargestellt.

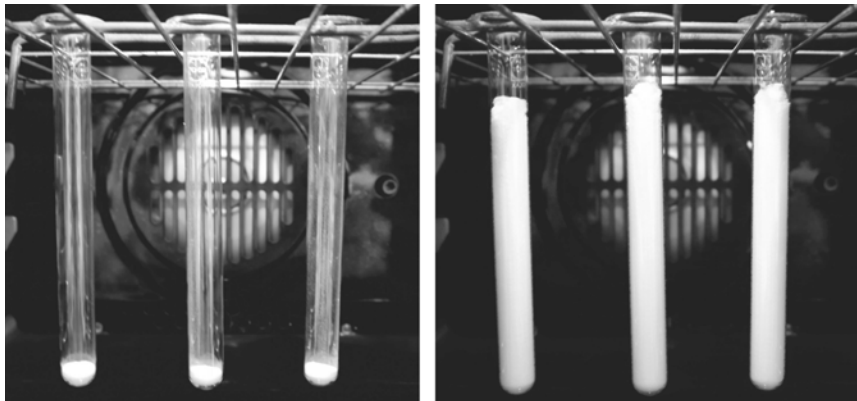


Bild 3: 0.25 g eines 65%ig konzentrierten Masterbatches (links) expandieren innerhalb von 5 Minuten bei 190 °C um mehr als das 22-fache (rechts)

Die Wechselwirkung der Mikrosphären mit der jeweiligen zu schäumenden Kunststoffschmelze ist grundlegend verschieden zu den bekannten Wechselwirkungen in zweiphasi-

gen Gas-Schmelze-Systemen. Entsprechend andere Bedingungen sind in den Schäumprozessen zu gewährleisten, um zu optimalen Schäumergebnissen zu gelangen.

Die Viskosität des Systems Expansionsmittel/Schmelze wird im Gegensatz zu gashaltigen Schmelzen nicht niedriger sondern höher. Es ist ein möglichst schneller Druckaufbau im Zylinder bzw. in der Plastiziereinheit zu gewährleisten, um frühzeitiges Expandieren der Sphären zu vermeiden. Besonders teilexpandierte Sphären sind sehr scherempfindlich und halten der Scherwirkung in der Schmelze durch die Schneckenbewegung kaum stand. Sind sie zerstört, verhält sich das System wie ein Zweiphasen-System. In der Regel werden die Gase dann nach Austritt der Schmelze aus der Düse wegen mangelnder Diffusionsbeständigkeit der Schmelze ohne Schäumwirkung entweichen.

Überstehen die Mikrosphären den Aufschmelzprozess bis zum ausreichenden Druckaufbau im Zylinder unbeschadet, so können sie bei relativ niedrigen Massedrücker unter 20 bar ohne Expansion in der Schmelze gehalten und zum Beispiel auf große Blasform-Extrusionswerkzeugquerschnitte verteilt oder vorher in Akkumulatoren mit großen freien Volumen gefördert werden und die Schmelze unter Druckentlastung dort bereits anexpandieren. Die Erstarrungstemperatur der umgebenden Kunststoffschmelze liegt oberhalb der Kondensationstemperatur der in den Mikrosphären eingeschlossenen Alkane, so dass auch nach der Kondensation der Alkane die Schaumstruktur, nun gestützt durch den erstarrten Matrixkunststoff, erhalten bleibt. Es resultiert eine irreversible Aufschäumung des Kunststoffes.

3. Typenvariationen von expandierbaren Mikrosphären

Es ist eine Vielzahl an Mikrosphären-Typen kommerziell erhältlich. Diese Typen unterscheiden sich in der Zusammensetzung der enthaltenen Alkane und in den Durchmessern im unexpandierten und expandierten Zustand. Über die verschiedenen Alkan-Abmischungen werden die Temperaturbereiche eingestellt, in denen die Expansion der Sphären beginnt bzw. bei welcher Temperatur die maximale Expansion erreicht wird. So können je nach Verarbeitungsparametern und zu schäumender Polymerschmelze die richtigen Mikrosphären-Typen eingesetzt werden. Je nach zu schäumender Teiledicke und gewünschter Haptik an Teile-Oberflächen können Sphären-Durchmesser (im expandierten Zustand) von 20 µm bis 120 µm gewählt werden.

Mittlerweile werden auch ‚Food Grade‘ Typen angeboten, die ausdrücklich für den Gebrauch in Kunststoffen mit Lebensmittelkontakt und in Spielzeugen geeignet sind und entsprechende Normen in der EU und den USA erfüllen [2]. Bild 4 zeigt die aktuell erhältlichen ‚Expancel‘

Mikrosphären-Typen des europäischen Herstellers ‚AkzoNobel Pulp and Performance Chemicals AB‘ aus Schweden.

Expancel	Particle Size $\mu\text{m}^{(1)}$ D(0.5)	Thermomechanical Analysis ⁽²⁾			Solvent Resistance ⁽³⁾
		Tstart, °C	Tmax, °C	Density kg/m ³	
551 DU 40	10–16	95–100	139–147	≤ 17	3
461 DU 20	6–9	100–106	137–145	≤ 30	4
461 DU 40	9–15	98–104	142–150	≤ 20	4
051 DU 40	9–15	108–113	142–151	≤ 25	4
031 DU 40	10–16	80–95	120–135	≤ 12	3
053 DU 40	10–16	96–103	138–146	≤ 20	3
093 DU 120	28–38	120–130	188–203	≤ 6.5	5
909 DU 80	18–24	120–130	175–190	≤ 10	5
920 DU 40	10–16	123–133	168–178	≤ 17	5
920 DU 80	18–24	123–133	180–195	≤ 14	5
920 DU 120	28–38	122–132	194–206	≤ 14	5
930 DU 120	28–38	122–132	191–204	≤ 6,5	5
950 DU 80	18–24	138–148	188–200	≤ 12	5
951 DU 120	28–38	133–143	190–205	≤ 9	5
980 DU 120	25–40	158–173	215–235	≤ 14	5
New product					
920 DU 20	5–9	120–145	155–175	≤ 25	5

Bild 4: Eine Vielzahl an erhältlichen Mikrosphären-Typen ermöglicht den Einsatz in verschiedenen Polymeren und für verschiedene Anwendungen
(Quelle: www.akzonobel.com)

4. Anwendungen von Mikrosphären-Schäumen

Sowohl in der Extrusion als auch im Spritzguss finden Mikrosphären-Schäume weltweit bereits breite Anwendung. Zu den hergestellten Produkten zählen unter anderem

- Schuhsohlen und Badesandalen (TPE, EVA; Spritzguss)
- Werkzeuggriffe (TPE, PS; Spritzguss)
- Reifen für Spielzeugräder (EVA, TPE; Spritzguss)
- Verbundschaumplatten (PP; Extrusion)
- Griffstopfen für Spirituosen und Stopfen für Weinflaschen (PS, TPE; Spritzguss, Extrusion)
- Dichtungsprofile für z.B. Glasleisten (TPE; Spritzguss, Extrusion)

Eine Auswahl dieser Beispiele ist in Bild 5 dargestellt.

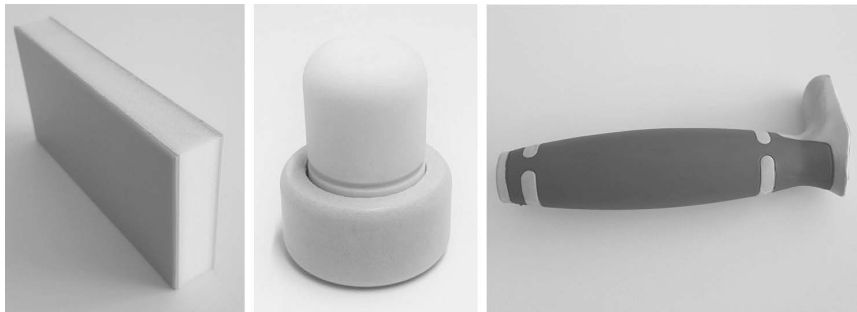


Bild 5: Produktbeispiele mit Mikrosphären-Schäumen (links nach rechts): Schalttafel mit PP-Schaum, Getränke-Stopfen mit PS- und TPE-Schaum, Werkzeuggriff mit PS-Schaum

Aufgrund der verhältnismäßig hohen Rohstoffkosten der expandierbaren Mikrosphären ist deren Einsatz dann sinnvoll, wenn mit herkömmlichen Gas-in-Schmelze-Verfahren die gestellten Prozess- oder Produktanforderungen nicht erfüllt werden können. Möchte man mit einer Bestandsanlage Blasformteile mit Schaumstruktur herstellen, reicht z.B. der Einsatz chemischer Treibmittelkonzentrate nicht aus, wie im folgenden Abschnitt erläutert wird.

5. Mit Mikrosphären geschäumte Blasformteile

Konventionelle Schäumverfahren, die mit Gas-in-Schmelze und somit einem 2-Phasen-System arbeiten, sind dann geeignet, wenn es an der Austrittsdüse zu einem möglichst großen Druckabfall kommt. Die Gase entspannen unmittelbar nach dem Verlassen der Düse und führen zum Ausdehnen der Schmelze. Es kommt zu einer Stabilisierung der Schaumstruktur in dem Maße, wie die Schmelze schließlich erstarrt.

Bei Blasformprozessen ist diese Voraussetzung nur eingeschränkt oder gar nicht gegeben. Daher können bei den bekannten Verfahren mit Co-Extrusion und einer geschäumten Mittelschicht nur entsprechend dünne Schaumschichten aus kleinen Düsenquerschnitten erzielt werden. Denn nur so ist gewährleistet, dass die Gase nicht schon vor Austritt aus der Düse im Extrusionswerkzeug bzw. im Akkumulator entweichen und so zum Aufreißen der Schmelze führen. Ein ungleichmäßiger Austritt der Schmelze aus der Düse über den Querschnitt wäre die Folge. Über die generierten äußeren kompakten Co-Extrusionsschichten wird die benötigte Diffusionsbeständigkeit erreicht, ohne welche die Gase aus der Schmelze entweichen würden ohne diese aufzuschäumen.

Wenn man auf Blasform-Anlagen Mikrosphären in die Schmelze einbringt, ist man nicht mehr auf die Einhaltung definierter Druckverhältnisse am Düsenaustritt gebunden. Da ein mikroskopisches 3-Phasen-System vorliegt, ist die Gasdiffusionsbeständigkeit der extrudierten Schmelze durch die eingebetteten Mikrosphären-Hüllen gewährleistet, aus denen die expandierenden Alkane nicht entweichen können. Damit können nahezu beliebig große Austrittsquerschnitte mit Schaumstruktur versehen werden und auch wechselnde Drücke ohne negative Auswirkungen auf die Schaumstrukturbildung akzeptiert werden. Es sind keine kompakten Co-Extrusionsschichten mehr erforderlich, aber möglich. Mit Hilfe von Co-Extrusionsschichten können Oberflächeneigenschaften und mechanische Eigenschaften erzeugt werden, wie sie für solche 3-Schicht-Systeme typisch sind.

Mithilfe von expandierbaren Mikrosphären können nicht nur besonders dicke Profilquerschnitte mit Schaumstrukturen versehen werden, sondern auch besonders dünne Schichten geschäumt werden. Bild 6 zeigt die mit Mikrosphären geschäumte Zwischenschicht eines Gummi-Drucktuchs mit einer Dicke von unter 800 µm. Entsprechend geringe Dicken sind bei Verwendung geeigneter Mikrosphären-Typen auch für geschäumte Mittelschichten bei Blasformteilen denkbar.



Bild 6: Mit expandierbaren Mikrosphären geschäumte Zwischenschicht eines Drucktuchs mit einer Schichtdicke von unter 800 μm

Wie bei dem Schäumen mit Gas-in-Schmelze, werden die Fließeigenschaften der Schmelze durch die expandierenden Mikrosphären beeinflusst. Während bei Gas-in-Schmelze-Systemen das eingebrachte Gas eine Verringerung der Viskosität bewirkt, ist die Beeinflussung durch Mikrosphären gegenteilig, da die Viskosität der Schmelze durch die expandierenden ‚Füllstoffe‘ scheinbar erhöht wird und die Dehnfähigkeit abnimmt. Dementsprechend sind Anpassungen der Schmelzeviskosität bzw. des Fließindex (MFI) des zu schäumenden Materials an die jeweiligen Prozessbedingungen und Teileformen gegebenenfalls erforderlich. Teile mit einer großen Verstreckung beim Blasformen und relativ hohem Mikrosphären-Anteil können z.B. den Einsatz einer Schmelze mit MFI 2,0 g/10min statt des üblichen MFI 0,2 – 0,5 g/10min erzwingen.

Teilweise kann diese Einschränkung des Fließvermögens Mikrosphären-haltiger Schmelzen durch die Mitverwendung eines geeigneten chemischen Treibmittels kompensiert werden. Die in der Schmelze freigesetzten Gase bewirken dabei eine Viskositätsminderung des Materials im Blasprozess.

Bisherige Versuchsergebnisse mit geschäumten Blasformteilen zeigen, dass ein effektiver Mikrosphären-Gehalt von 1,0 % Gew. sinnvoll ist. Damit ist mit Mikrosphären-Durchmessern von 120 μm im expandierten Zustand Schaumdichten von ca. 0,6 g/cm³ erreichbar. Das entspricht einer Gewichtsreduzierung blasgeformter Teile von bis zu 30 %.

Für besonders dünne Schichten können Mikrosphären mit z.B. 80 µm Durchmesser (expandiert) sinnvoll sein, wobei die resultierende Schaumstruktur entsprechend feiner und mit höheren mechanischen Eigenschaften ausgestattet wird. Auch bei Verwendung von 120 µm-Sphären ist die Schaumstruktur so fein, dass, anders als bei Gas-in-Schmelze-Systemen, die Schaumzellen mit dem bloßen Auge nicht zu erkennen sind. Dass eine Schaumstruktur vorhanden ist, erkennt man an sich verändernden Prozessparametern, da das extrudierte Volumen des Blasformschlauches zunimmt. Zudem tritt aufgrund der Lichtbrechung an den Schaumzellen eine Trübung der Schmelze ein. Die hergestellten Teile sind natürlich leichter bei gleicher Wandstärke. Entsprechende Anpassungen bei den Düsenspaltvariationen sind für jedes Blasformteil erforderlich.

Mikrosphären sind relativ teure Expansionsmittel. Die Effizienz ihrer Verwendung für Blasformteile wird in hohem Maße davon bestimmt, wie hoch der Nutzenanteil am Blasformschlauch gestaltet werden kann. Die Abfallanteile können, wie üblich, dem Blasformprozess wieder direkt zugeführt werden. Ihr Anteil sollte jedoch kontrolliert und konstant gehalten werden. Abhängig vom jeweiligen Prozess werden Schaumanteile den erneuten Plastizierungsvorgang überstehen und dementsprechend anteilig zur Schäumung beitragen. Bei ungleichmäßiger Zugabe würde dies Instabilitäten in der Prozessführung bewirken, mit wechselnden Schäumgraden und Dehnungsverhalten des Blasformschlauches.

Abschließend sind in Bild 7 und Bild 8 Beispiele von geschäumten Blasformteilen abgebildet, die mit Hilfe von expandierbaren Mikrosphären hergestellt wurden. Es handelt sich um einschichtige Blasformteile aus Polyethylen, die an einer Bestandsanlage für kompakte Teile gefertigt wurden, ohne dass Umbauarbeiten vorgenommen werden mussten. In beiden Fällen wurde Material mit einem Schmelzflussindex von 2,0 g/10min verarbeitet und eine Teilegewichtsreduktion um bis zu 30 % erreicht. Als Expansionsmittel wurden 1,5 % Gew. eines 65%ig konzentrierten Mikrosphären-Masterbatches, sowie 0,5 % Gew. eines endothermen chemischen Treibmittel-Masterbatches eingesetzt. Die verwendeten Mikrosphären hatten im unexpandierten Zustand einen Durchmesser von ca. 35 µm und im expandierten Zustand innerhalb der Schaumstruktur ca. 120 µm Durchmesser.

Bild 9 zeigt eine Mikroskopaufnahme einer solchen Schaumschicht.



Bild 7: Mit expandierbaren Mikrosphären geschäumtes Blasformteil aus PE-HD mit komplexer Geometrie in Kooperation mit ‚Mergon International‘ aus Irland



Bild 8: Mit expandierbaren Mikrosphären geschäumtes Blasformteil aus PE-LD mit komplexer Geometrie in Kooperation mit ‚Mergon International‘ aus Irland

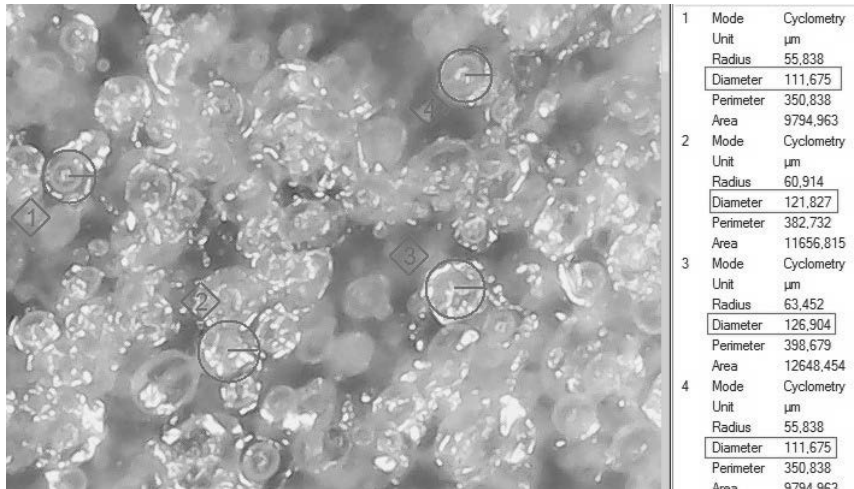


Bild 9: Mikroskopaufnahme eines mit expandierbaren Mikrosphären geschäumten Blasformteils

Die Verwendung von expandierbaren Mikrosphären für Blasformverfahren eröffnet neue technische Möglichkeiten zur Herstellung von Formteilen mit Schaumstrukturen in Einschicht- und Mehrschichtverfahren. Es ergeben sich Varianten zur Material- und Gewichtseinsparung, aber auch zur Modifikation weiterer Teileigenschaften, wie der Wandungssteifigkeit, der Akustik oder der Optik und Haptik. Von besonderem Vorteil dabei ist, dass von Bestandsanlagen zum Blasformen ausgegangen werden kann, an denen die erforderlichen Änderungen (wie Polymer- und Prozessparameter) zur Herstellung geschäumter Formteile sehr überschaubar sind.

- [1] Lenz, S.: Auszeichnungen für revolutionäre Entwicklung. K-Zeitung Online (2016) <http://www.k-zeitung.de/auszeichnungen-fuer-revolutionaere-entwicklung/150/1195/94042/>
- [2] EXPANCEL® MIKROSPHÄREN, das etwas andere Treibmittel zum Schäumen von thermoplastischen Kunststoffen und Elastomeren, Fachaufsatz, Schönox GmbH, AkzoNobel, Essen 2013

Aktuelle Entwicklungen in der Produktsimulation blasgeformter Kunststoffhohlkörper

Verbesserungspotenziale durch Berücksichtigung des zeit- und prozessabhängigen Materialverhaltens

M. Eng. **P. Michels**, Hochschule Bonn-Rhein-Sieg, Sankt Augustin;
Dr.-Ing. **O. Bruch**, M. Eng. **D. Grommes**,
Dr. Reinold Hagen Stiftung, Bonn

Kurzfassung

Die Produktsimulation blasgeformter Kunststoffhohlkörpern ist trotz ausgereifter Software nach wie vor mit Unsicherheiten verbunden. Der Grund dafür ist vor allem in der unzureichenden Materialbeschreibung von Polymer-Werkstoffen zu suchen. Das komplexe zeit- und temperaturabhängige Werkstoffverhalten erfordert oftmals eine Abkehr von einfachen linear elastischen Materialmodellen hin zu komplexeren nichtlinear viskoelastisch-plastischen Modellen. Darüber hinaus hat auch der Verarbeitungsprozess maßgeblichen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften des Endproduktes. Eine Konsequenz daraus ist, dass lokale Materialparameter nicht mehr als konstant, sondern vielmehr als Funktion bestimmter Prozessparameter anzusehen sind. Im Rahmen des bereits abgeschlossenen Forschungsprojektes MatRes¹ gelang es erstmals das prozessspezifische Materialverhalten blasgeformter Kunststoffhohlkörper zu identifizieren und in die Produktsimulation einzubinden. Diese Materialbeschreibung konnte dann im aktuellen Forschungsvorhaben ReBauVES² dahingehend erweitert werden, dass auch Betrag und Richtung der lokalen Verstreckungen, sowie die damit verbundene Orthotropie berücksichtigt werden. Zukünftig soll es gelingen, durch die Verwendung prozessabhängiger viskoelastisch-plastischer Materialmodelle sowohl das Langzeitverhalten als auch das dehnratenabhängige Kurzzeitverhalten blasgeformter Hohlkörper mit hinreichender Genauigkeit zu beschreiben.

¹ **MatRes** – Material- und Ressourceneffizienz für blasgeformte Kunststoffhohlkörper. Projektpartner: Dr. Reinold Hagen Stiftung, Hochschule Bonn-Rhein-Sieg, Ingenieurbüro Feuerherm. *Projektförderung:* NRW Ziel 2-Programm 2007 – 2013 (EFRE)

² **ReBauVES** – Ressourcenoptimierte Bauteilentwicklung durch systematische Verzahnung von Experiment und multiskaligen Simulationsansätzen. *Projektpartner:* Dr. Reinold Hagen Stiftung, Hochschule Bonn-Rhein-Sieg, Kautex Maschinenbau GmbH, Fraunhofer Institut SCAL. *Projektförderung:* Förderprogramm FHprofUnt des BMBF (Förderkennzeichen: 03FH051PX4)

1. Motivation

Der Einsatz von Simulationsverfahren gewinnt in der kunststoffverarbeitenden Industrie zunehmend an Bedeutung. Leistungsstarke CAE³-Werkzeuge ermöglichen es Ingenieuren und Produktdesignern immer früher in den Prozess der Produktentwicklung einzugreifen. In Bezug auf die hohen Stückzahlen blasgeformter Kunststoffhohlkörper birgt eine frühzeitige Optimierung der Produktperformance ein enormes Einsparpotential an Material, Zeit und Geld. Zu viel von diesem Potential wird jedoch nach wie vor durch die zum Teil unzureichende Vorhersagegenauigkeit der Produktsimulation verschenkt.

Ein großer Unsicherheitsfaktor ist dabei nach wie vor das komplexe Materialverhalten von Polymer-Werkstoffen. Oftmals können schon im normalen Gebrauchsbereich Temperatur- und Zeitabhängigkeit des mechanischen Verhaltens nicht mehr vernachlässigt werden [1]. Darüber hinaus deuten aktuelle Studien darauf hin, dass auch der Verarbeitungsprozess des Blasformens einen zum Teil erheblichen Einfluss auf lokale Materialparameter hat [2]. Die derzeit in Kurzzeitversuchen verwendeten Simulationsmodelle beruhen oft noch auf einfachen isotropen linear elastischen bzw. elastoplastischen Werkstoffmodellen, welche die Zeit- und Temperaturabhängigkeit des mechanischen Verhaltens per se vernachlässigen. Außerdem werden die benötigten Materialparameter in der Regel den Datenblättern der Rohstoffhersteller entnommen, welche somit auch das spezifische Verarbeitungsverfahren unberücksichtigt lassen.

Um blasgeformte Artikel schon in einem frühen Stadium der Produktentwicklung in Richtung Leichtbau zu optimieren, und dabei weitestgehend auf teure Prototypenversuche zu verzichten, muss es gelingen, das lokale prozess- und zeitabhängige Materialverhalten im Simulationsmodell abzubilden. Bezüglich der Prozessabhängigkeit muss dafür die Prozesshistorie mit eingebunden werden, sodass Prozess- und Struktursimulation unmittelbar miteinander verknüpft sind. Die Verwendung blasgeformter Probekörper für die Bestimmung von Materialparametern ist dafür unerlässlich [2]. Im Rahmen des Forschungsprojektes ReBauVES konnte der Aufbau einer Entwicklungsumgebung zur Einbindung prozessabhängiger orthotroper Materialparameter bereits erfolgreich realisiert werden. Der nächste Schritt besteht in der Erweiterung dieser Materialbeschreibung auf eine zeitabhängige Modellierung, die es erlaubt das nichtlineare Spannungs-Dehnungsverhalten von Polymer-Werkstoffen hinreichend genau abzubilden.

³ Computer Aided Engineering

2. Berücksichtigung des prozessabhängigen Materialverhaltens

In dem vorausgegangenen Forschungsvorhaben MatRes erfolgten bereits erste Untersuchungen zur Identifizierung der prozessspezifischen Einflussfaktoren auf den Elastizitäts-Modul extrusionsblasgeformter Kunststoffhohlkörper. Verwendet wurde dafür ein High Density Polyethylen (HDPE) von Lyondell Basell unter dem Handelsnamen Lupolen 4261A [4]. HDPE ist ein sogenannter teilkristalliner Polymer-Werkstoff, der sowohl über ungeordnete amorphe als auch dichtgepackte kristalline Bereiche verfügt. Der Anteil an kristallinen Phasen wird als Kristallisationsgrad bezeichnet [3]. Aus der Literatur ist bekannt, dass mit steigendem Kristallisationsgrad, der wiederum maßgeblich durch die Abkühlverhältnisse beeinflusst wird, auch Materialparameter wie E-Modul und Streckspannung ansteigen [3,4]. Außerdem werden sowohl durch die Extrusion des Vorformlings als auch durch das spätere Aufblasen Orientierungen in den Werkstoff eingebracht, die zu anisotropen Materialverhalten führen [2,5].

Grommes et. al untersuchten daher vorrangig die Prozessparameter, von denen anzunehmen ist, dass sie den Kristallisationsgrad sowie die Ausbildung von Orientierungen beeinflussen. Dafür wurden Probekörper aus blasgeformten Versuchsartikeln unter variierenden Prozessbedingungen in Extrusionsrichtung und quer zu dieser entnommen. Als Prozessparameter wurden unter anderem Verstreckgrad, Formtemperatur und Kühlzeit ausgewählt. Die statistische Auswertung des Effektes der verschiedenen Prozessparameter auf den E-Modul macht den Einfluss des Verarbeitungsverfahrens deutlich. Der E-Modul in Extrusionsrichtung liegt somit bis zu 8% höher als der E-Modul in Umfangsrichtung. Des Weiteren zeigen Parameter Verstreckgrad und Formtemperatur sowie die Wechselwirkung von Formtemperatur und Kühlzeit einen Einfluss von jeweils etwa 3% auf den E-Modul. Dieser kann damit wie folgt in Abhängigkeit von Entnahmerichtung n_i , Verstreckgrad λ , Formtemperatur ϑ_F und Kühlzeit t_K dargestellt werden [5]:

$$E = f(n_i, \lambda, \vartheta_F, t_K) \quad (1)$$

Einbindung prozessabhängiger orthotroper Materialparameter in die Strukturanalyse

Die zuvor vorgestellte Modellgleichung ermöglicht die Berechnung eines lokalen prozessabhängigen Elastizitäts-Moduls in zwei orthogonal zueinander stehenden Richtungen. Die Parameter Formtemperatur und Kühlzeit können dabei als global konstant betrachtet werden. Anders sieht es jedoch bei der Verstreckung aus. Betrachtet man einen komplexen Blasformartikel, so können Betrag und Richtung der biaxialen Verstreckung während des Aufbla-

sens örtlich recht stark variieren. Der E-Modul ist somit eine Funktion der lokalen Verstreckverhältnisse, sodass diese für jedes Element der Struktursimulation bekannt sein müssen [5]. Erste Ansätze zur Einbindung eines verstreckgradabhängigen orthotropen E-Moduls finden sich bereits in verschiedenen Arbeiten zum Streckblasformen, unter anderem in [6,7]. Diese gehen jedoch lediglich von einer Orientierung in Axial- und Umfangsrichtung aus, was für die in der Regel symmetrischen Flaschen aus Polyethylenterephthalat (PET) als ausreichend genau betrachtet werden kann. Dies kann nicht ohne weiteres auf die komplexen asymmetrischen Geometrien extrusionsblasgeformter Hohlkörper übertragen werden. Dafür müssen sowohl Betrag als auch Richtung der biaxialen Verstreckung in den Hauptrichtungen ermittelt werden [5].

Der Einbindungsprozess eines orthotropen prozessabhängigen E-Moduls in die Struktursimulation eines typischen blasgeformten Kunststoffhohlkörpers ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.

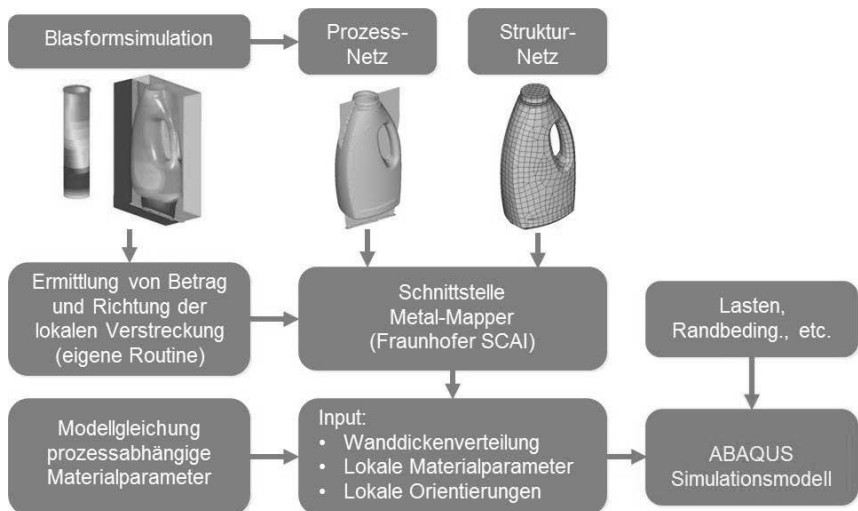


Bild 1: Entwicklungsumgebung zur Berücksichtigung prozessabhängiger Materialparameter in der Struktursimulation blasgeformter Kunststoffhohlkörper, angelehnt an [5]

Zur Bestimmung von Betrag und Richtung der Verstreckung werden die Ergebnisse der Prozesssimulation des Blasformens via B-Sim herangezogen. Ein an der Dr. Reinold Hagen Stiftung entwickeltes Interface ermittelt aus den Ergebnissen der Blasformsimulation die Verstreckgrade in den Hauptrichtungen. Diese müssen dann anschließend zusammen mit

der Wanddickenverteilung vom Prozess-Netz auf das Struktur-Netz übertragen werden. Dafür wird eine vom Fraunhofer-Institut für Algorithmen und Wissenschaftliches Rechnen SCAI entwickelte Schnittstelle, der sogenannte Metal-Mapper verwendet. Nach dem Mapping liegen die Informationen für jedes Element des Struktur-Netzes vor, sodass die lokalen E-Module über Formel 1 in Abhängigkeit der Verstreckung berechnet und über ein orthotropes Materialgesetz unter Berücksichtigung ihrer Orientierung in die Strukturanalyse eingebunden werden können [5].

Die E-Modulverteilung einer typischen blasgeformten Kunststoffflasche über den zuvor vorgestellten Ansatz ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.

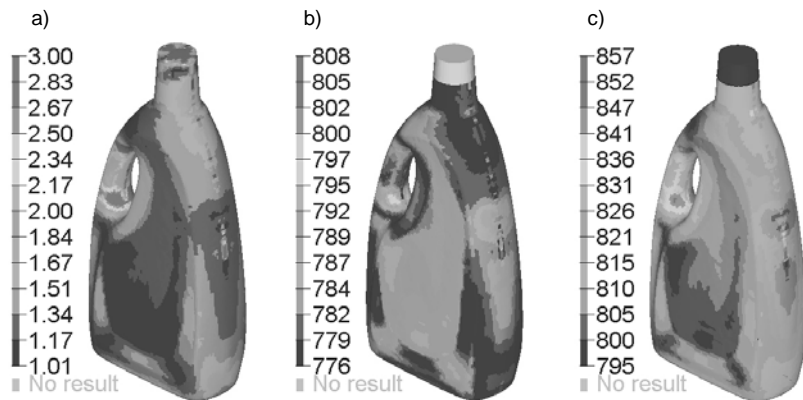


Bild 2: E-Modulverteilung einer typischen blasgeformten Griffflasche. a) Verstreckgradverhältnis, b) E-Modul in Hauptrichtung 1 (Richtung der max. Verstreckung), c) E-Modul in Hauptrichtung 2 (Richtung der min. Verstreckung), angelehnt an [5]

Da die Werkstoffversuche in [2] sich lediglich auf eine uniaxiale Verstreckung beziehen, wird die biaxiale Verstreckung auf eine uniaxiale Verstreckung zurückgeführt, indem das Verstreckgradverhältnis gebildet wird. Bei Verstreckgradverhältnissen von eins wird somit entweder gar nicht verstreckt, oder die Verstreckung in beiden Hauptrichtungen ist gleich groß. In diesem Fall wird von isotropen Materialverhalten ausgegangen. Bei ansteigendem Verstreckgradverhältnis zeigt sich dann der Einfluss von Probenentnahmerichtung und Verstreckung [5].

Zusätzlich wird die orthotrope prozessabhängige linear elastische Materialbeschreibung mit einer orthotropen prozessabhängigen plastischen Materialbeschreibung überlagert. Dafür

wird das Fließkriterium nach Mises-Hill verwendet [8,9]. Die Orthotropie der Fließfläche wird dabei über die sogenannten R-Werte realisiert.

Validierung der prozessabhängigen orthotropen Materialbeschreibung

In einem simulationsgestützten Top-Load-Test wurden mehrere Simulationsmodelle mit unterschiedlicher Materialbeschreibung experimentellen Messungen gegenübergestellt. Der Top-Load-Test ist ein Standardverfahren zur Beurteilung der Stapelfähigkeit von Flaschen und Kanistern. Dabei wird die Kunststoffflasche weggesteuert zwischen zwei Metallplatten gestaucht und die Reaktionskraft, die die Flasche der Stauchung entgegensetzt, über dem Stauchweg dargestellt. Ein nichtlineares statisches Simulationsmodell der in Bild 2 dargestellten Griffflasche wurde für die Simulation verwendet. Da es sich um eine verschlossene luftgefüllte Flasche handelt, wird der Innendruck im Simulationsmodell mit berücksichtigt. Tabelle 1 zeigt die unterschiedlichen Materialbeschreibungen der Simulationsmodelle. Allen Modellen liegt eine linear elastische Materialmodellierung überlagert mit einer plastischen Modellierung über das van Mises Fließkriterium (isotrop) oder das Mises-Hill Fließkriterium (orthotrop), zu Grunde. Alle Materialparameter wurden an dem HDPE-Typ Lupolen 4261A von Lyondell Basell ermittelt.

Tabelle 1: Materialmodelle für den simulationsgestützten Top-Load-Test, angelehnt an [5]

Modell	Probekörper	Materialverhalten	Kurzbeschreibung
ISO_SG	spritzgegossen	Isotrop	Materialdaten spritzgegossener Probekörper
ORTHO	blasgeformt	orthotrop, prozessabhängig	Orthotropes prozessabhängiges Materialmodell in Abhängigkeit der lokalen Verstreckverhältnisse
ISO_MVG	blasgeformt	isotrop, prozessabhängig (konstanter Verstreckgrad)	Isotropes prozessabhängiges Materialmodell unter Verwendung des Mittelwertes der Verstreckung über der gesamten Flasche

Die Ergebnisse sind in Abbildung 3 dargestellt. Deutlich zu erkennen ist der große Einfluss des Verarbeitungsverfahrens. Die Verwendung von Materialdaten spritzgegossener Probekörper (ISO_SG) führt zu einer deutlichen Überschätzung der Top-Load von mehr als 20%. Beide Materialmodelle, die auf Materialdaten blasgeformter Probekörper basieren, sagen die Top-Load wesentlich präziser voraus. Der Einfluss der prozessabhängigen orthotropen Ma-

terialbeschreibung ist dabei in diesem konkreten Beispiel als eher gering einzustufen. So ist die Kraft-Weg Kurve der orthotropen prozessabhängigen Materialbeschreibung (ORTHO) zwar geringfügig steiler als die der isotropen (ISO_MVG), allerdings ist die Abweichung kleiner als 1% und hat somit so gut wie keinen Einfluss auf das Endergebnis. Es kann somit davon ausgegangen werden, dass eine prozessabhängige isotrope Materialmodellierung unter Verwendung eines gemittelten Verstreckgrades hinreichend genaue Ergebnisse liefert. Es ist jedoch nicht auszuschließen, dass bei anderen Bauteilen bzw. anderen Prüfmethoden, Materialien und Prozessbedingungen der Einfluss einer lokalen verstreckgradabhängigen orthotropen Materialbeschreibung durchaus eine größere Rolle spielen könnte.

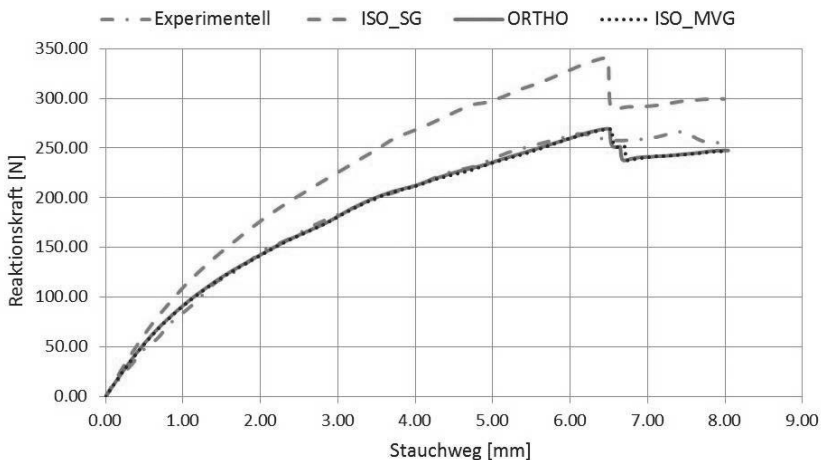


Bild 3: Gegenüberstellung von Simulationen unterschiedlicher Materialbeschreibungen mit experimentell ermittelten Versuchsdaten eines Top-Load Test

3. Berücksichtigung des zeitabhängigen Materialverhaltens

Nachdem das prozessabhängige Materialverhalten in die Simulation eingebunden ist, gilt es diese Materialbeschreibung auf eine zeitabhängige Modellierung zu erweitern. Zeitabhängige Effekte spielen nicht nur beim Langzeitverhalten, sondern auch beim Kurzzeit- und Crashverhalten von blasgeformten Kunststoffhohlkörpern eine entscheidende Rolle. Betrachtet man beispielsweise den Top-Load Test, der zu den Kurzzeitversuchen zählt, ist die Belastungsgeschwindigkeit durch die gültigen Normschriften vorgegeben. So gibt die ASTM D2659 einen Bereich von 12,5 mm/min – 50 mm/min und die mittlerweile zurückgezogene deutsche Norm DIN 55526 eine Geschwindigkeit von 10 mm/min vor. Dass die maximale

Top-Load sich dabei stark unterscheiden kann wird in der nachfolgenden Abbildung verdeutlicht. Dafür wurde die bisher betrachtete Griffflasche aus HDPE in einem Top-Load Test mit unterschiedlichen Belastungsgeschwindigkeiten weggesteuert gestaucht. Die Top-Load wird bei einem Anstieg der Belastungsgeschwindigkeit von 10 mm/min auf 50 mm/min um etwa 20% erhöht.

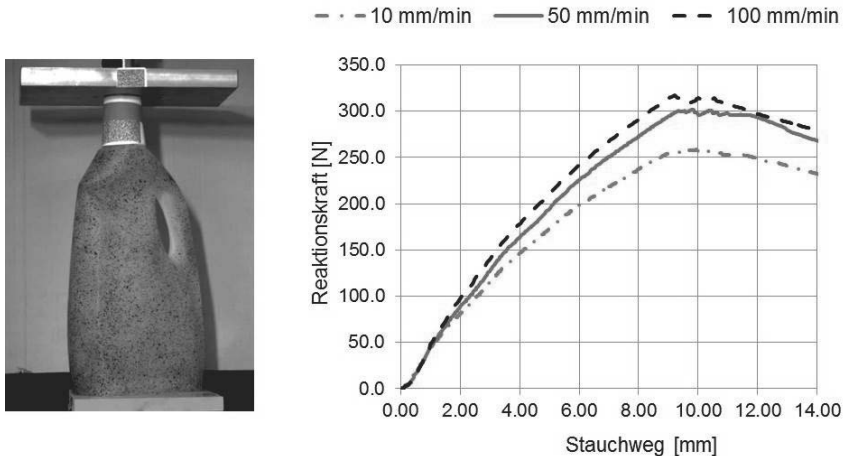


Bild 4: Top-Load Test der Griffflasche unter variierender Belastungsgeschwindigkeit

Problematisch ist dabei auch, dass das Hauptaugenmerk auf der Belastungsgeschwindigkeit und nicht auf der lokalen Dehnrate liegt. Diese kann je nach Abmessungen und Geometrie des Kunststoffbehälters recht stark variieren. Folglich kann eine zeitunabhängige Materialmodellierung nur dann zu aussagekräftigen Simulationsergebnissen führen, wenn die Dehnrate nicht zu stark variiert und die gemittelte Dehnrate in einem ähnlichen Größenverhältnis zur Dehnrate der durchgeführten Werkstoffversuche steht. Um das mechanische Verhalten zuverlässig mithilfe der Simulation beschreiben zu können, ist somit die Verwendung eines komplexeren Materialmodells notwendig.

Mechanisches Verhalten von Polymerwerkstoffen

Generell kann man bei der Materialbeschreibung von Polymer-Werkstoffen von einer Überlagerung elastischer, viskoser und plastischer Effekte ausgehen [1,10]. Die Überlagerung von elastischen und viskosen Materialverhalten wird dabei auch als Viskoelastizität bezeichnet. Kunststoffe verhalten sich oft in einem recht großen Dehnungsbereich nichtlinear

viskoelastisch. Das Materialverhalten weist dabei sowohl Abhängigkeiten von der Dehnrage, als auch von der Belastungshöhe auf. Linear viskoelastische Ansätze, wie z.B. der General Maxwell Ansatz, können von der Theorie her nur für kleine Dehnungen verwendet werden und sind darüber hinaus nur für ein Spannungs-bzw. Dehnungsniveau kalibriert. Die auftretenden Verformungen sind dabei vollkommen reversibel. Während sich der elastische Anteil sofort nach der Entlastung zurückverformt, erfolgen die viskoelastischen Rückstellungsvorgänge zeitverzögert. Erst ab dem Erreichen der Fließgrenze setzt eine irreversible plastische Verformung ein. Da diese jedoch für die meisten Kunststoffe nicht bekannt ist, ist es kaum möglich zwischen irreversibler und reversibler Verformung zu unterscheiden. Oftmals wird die Streckspannung (erstes lokales Maximum der Spannungs-Dehnungs Kurve) in der Materialmodellierung als Fließgrenze herangezogen. Dies birgt jedoch Risiken, da das plastische Fließen in der Regel schon vorher einsetzt [11]. Für die experimentelle Bestimmung der Fließgrenze existiert bisher keine allgemeingültige Norm. Einige Studien, unter anderem [11-15], widmen sich der experimentellen Bestimmung der Fließgrenze durch den sogenannten Strain-Recovery Test. Dabei werden Werkstoffproben auf inkrementell steigende Dehnungsniveaus belastet und anschließend wieder entlastet. Für jedes Dehnungsniveau wird dann nach einer definierten Zeitspanne festgestellt, ob sich die Probe wieder in den Ursprungszustand zurückverformt, oder sich eine bleibende Restdehnung einstellt [12] (s. Abb. 5).

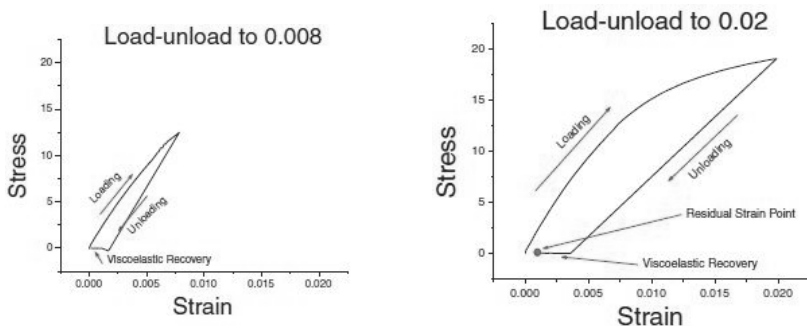


Bild 5: Strain Relaxation Tests bei unterschiedlichen Dehnungsniveaus [15]. Während bei einer aufgetragenen Dehnung von 0.008 die Probe vollständig relaxiert, bleibt bei einer aufgetragenen Dehnung von 0.02 eine plastische Restdehnung

Die Zeitspanne muss dabei so gewählt werden, dass sich auch der viskoelastische Anteil vollständig zurückgebildet hat. Das Dehnungsniveau, ab dem sich eine bleibende Restdehnung einstellt, wird dann als Fließgrenze festgelegt.

Modellierung des nichtlinearen viskoelastisch-plastischen Materialverhaltens

Für die Modellierung des nichtlinearen temperatur- und zeitabhängigen Spannungs-Dehnungsverhalten von Polymer-Werkstoffen existiert bereits eine Vielzahl an zum Teil recht komplexen Materialmodellen wie z.B. Bergström-Boyce Modell, das 3- Network Modell oder das Parallel Network Modell. Die Kalibrierung dieser Modelle kann jedoch mitunter recht aufwendig sein [16].

In der Regel erfolgt diese über das sogenannte Reverse Engineering [1]. Der prinzipielle Ablauf ist in Abb. 6 dargestellt.

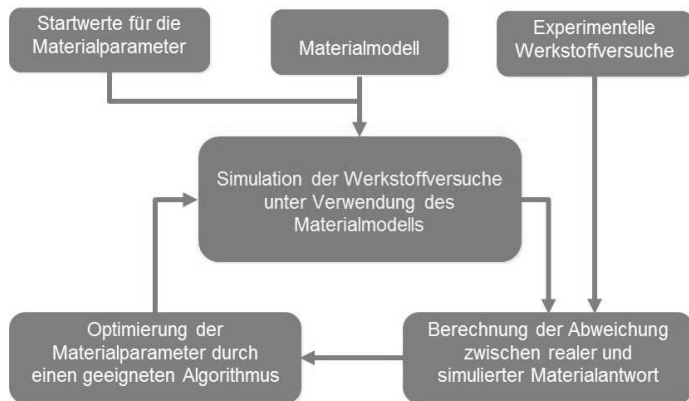


Bild 6: Anwendung von Reverse Engineering zur Kalibrierung eines komplexen Materialgesetzes, angelehnt an [17]

Für die Kalibrierung werden die Materialparameter eines simulationsgestützten Werkstoffversuchs so lange angepasst, bis die Simulationsergebnisse hinreichend genau mit experimentellen Werkstoffversuchen übereinstimmen. Mathematisch gesehen führt dies unweigerlich zu einem Optimierungsproblem. Dafür muss eine Zielfunktion gebildet werden, die dann durch einen geeigneten Algorithmus optimiert wird. Als Zielfunktion kann beispielsweise die eingeschlossene Fläche zwischen experimenteller und simulierter Materialkurve in Abhängigkeit der Materialparameter gewählt werden. Für diese Funktion gilt es dann nach Möglichkeit ein Minimum zu finden [1].

Es wird schnell ersichtlich, dass die Kalibrierung eines solchen Materialgesetzes ein großes Erfahrungswissen des Berechnungsingenieurs voraussetzt. Außerdem müssen geeignete Softwarelösungen für die Durchführung der Parameteroptimierung zur Verfügung stehen.

Dafür können beispielsweise kommerzielle Optimierungswerkzeuge wie Hyperstudy von Altair oder Isight von Simulia verwendet werden.

Ein weiteres Problem besteht darin, dass die meisten dieser Materialmodelle in kommerziellen FEM-Programm-Paketen oftmals nicht zur Verfügung stehen und somit beispielsweise als USER-Materialien eingebunden werden müssen.

Im Rahmen des Forschungsprojektes ReBauVES soll es gelingen mit erweiterten Materialansätzen, insbesondere dem bereits im FEM-Programm-Paket Simulia/Abaqus implementierten Materialmodell Parallel Rheological Framework (PRF) [8,18], das nichtlineare zeitabhängige Werkstoffverhalten von blasgeformten Kunststoffhohlkörpern abzubilden. Für die notwendigen Materialdaten werden zurzeit im Rahmen einer Bachelorarbeit Strain-Recovery Tests zur Bestimmung der Fließgrenze von HDPE durchgeführt. Galounts [19] entwickelte einen speziellen Versuchsaufbau für eine Universalzugprüfmaschine, in dem die Materialprobe mittels einer pneumatischen Klemme zur Entlastung einseitig ausgespannt wird. Um den Dehnungsverlauf über der Zeit darzustellen, wird auf eine optische Dehnungsmessung zurückgegriffen. Dafür kommt das Aramis System der Firma GOM zum Einsatz (s. Abb.7).

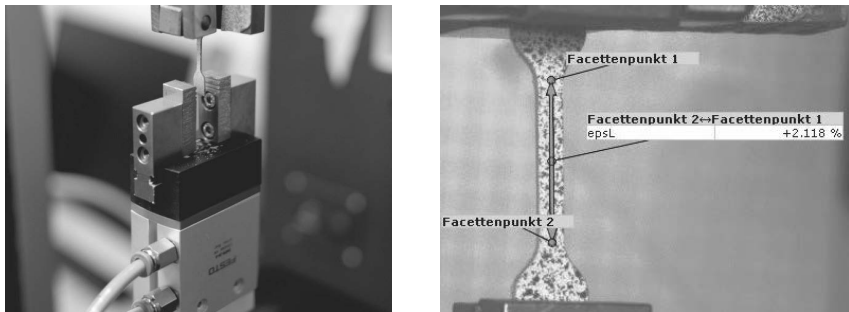


Bild 7: Klemme zur schlagartigen Entlastung der Zugprobe (rechts) und optische Dehnungsmessung (rechts) mit Hilfe des Messsystems Aramis von GOM

Die Proben werden auf inkrementell steigende Dehnungsniveaus belastet und anschließend ausgespannt. Mithilfe der optischen Dehnungsmessung werden dann solange Messwerte aufgenommen, bis sich die Werte nur noch geringfügig ändern. Das erste Dehnungsniveau, ab dem sich eine bleibende Restdehnung einstellt, wird mit der dazugehörigen Spannung aus dem Spannungs-Dehnungs-Diagramm als Fließgrenze festgelegt [19].

Die Untersuchungen beziehen sich dabei zunächst auf eine einzige Dehnrates, sollen aber später auch auf weitere Dehnrates ausgeweitet werden um die Fließgrenze sowie die Verfestigung in Abhängigkeit der Belastungsgeschwindigkeit modellieren zu können.

Zur Kalibrierung des nichtlinear viskoelastischen Anteils des Materialgesetzes sind unter anderem Zugversuche und Relaxationsversuche bei unterschiedlichen Dehnungsniveaus an blasgeformten Probekörpern geplant. Dabei gilt es zunächst herauszufinden, bis zu welchen Dehnungsniveaus eine linear viskoelastische Materialbeschreibung noch ausreichend genaue Ergebnisse liefert. Anschließend soll mit den vorhandenen Materialkurven das nichtlineare Materialgesetz Parallel Rheological Framework mit Hilfe der Software Simulia/Isight kalibriert werden. Die erfolgreiche Kalibrierung ist bereits in anderen Arbeiten gut dokumentiert. So konnte beispielsweise Delrymple recht gute Ergebnisse bei der Kalibrierung von Polypropylen erzielen [13]. Dafür hat Delrymple einen Zugversuch mit einer recht hohen Dehnrates von 100 1/s sowie drei Relaxationsversuche bei unterschiedlichen Dehnungsniveaus unterhalb der Fließgrenze durchgeführt. Es wurde zunächst ein linear viskoelastischer Ansatz verwendet, der jedoch keine zufriedenstellenden Ergebnisse lieferte. Die Ursache dafür ist, dass sich Polypropylen in dem untersuchten Dehnungsbereich bereits nichtlinear viskoelastisch verhält. Das Parallel Rheological Framework Modell erzielte hingegen nach erfolgreicher Kalibrierung sehr gute Ergebnisse [13].

4. Zusammenfassung & Ausblick

Die Produktsimulation gewinnt in der Blasformbranche zunehmend an Bedeutung. Das Potential der Simulation bereits in einem frühen Stadium der Produktentwicklung Ressourcen zu sparen ist enorm, wird jedoch noch nicht vollständig genutzt. Ein Grund dafür ist, dass das komplexe Werkstoffverhalten von Polymer-Werkstoffen oft unberücksichtigt bleibt. Im Rahmen des Forschungsvorhabens ReBauVES konnte eine prozessabhängige orthotrope Materialbeschreibung, die die Prozesshistorie berücksichtigt, bereits erfolgreich implementiert werden. Während die Berücksichtigung der lokalen Verstreckgrade in Zusammenhang mit der Orthotropie eine eher untergeordnete Rolle spielen, konnten die Simulationsergebnisse durch die Verwendung von Materialdaten blasgeformter Proben deutlich verbessert werden. Durch eine Erweiterung auf eine nichtlinear viskoelastisch-plastische Beschreibung sollen zukünftig auch zeitabhängige Effekte berücksichtigt werden. Damit soll es gelingen, sowohl das Langzeit- als auch das Kurzzeitverhalten mit hinreichender Genauigkeit durch die Produktsimulation beschreiben zu können.

Literaturhinweise

- [1] Bruch, O.: Materialbeschreibungen für die Crash-Berechnung von Kunststoffbauteilen. Universität Siegen Diss. 2009
- [2] D. Grommes, O. Bruch, J. Geilen: Investigation of the influencing factors on the process-dependent elasticity modulus in extrusion blow molded plastic containers for material modelling in the finite element simulation, AIP Conference Proceedings 1779 (2016) S. 50013-1-50013-5.
- [3] Ehrenstein, G.: Polymer-Werkstoffe. Struktur Eigenschaften Anwendung. München: Carl Hanser Verlag 2011
- [4] Beerbaum, H.: Ermittlung strukturbezogener bruchmechanischer Werkstoffkenngröße an Polyethylen-Werkstoffen. Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg Diss. 1999
- [5] Michels, P., Oeckerath, A., Bruch, O., Grommes, D., Reith, D.: An integrative simulation concept for extrusion blow molded plastic bottles. Paper in Bearbeitung eingereicht bei Finite Elements in Analysis and Design, Elsevier (2017)
- [6] Leopold, T.: Rechnergestützte Auslegung streckblasgeformter Kunststoffhohlkörper. RWTH Aachen Diss. 2011
- [7] Hopmann, C., Michaeli, W., Rasche, S.: FE-Analysis of Stretch-Blow Moulded Bottles Using an Integrative Process Simulation. AIP Conference Proceedings 1353 (2011) S. 868-873.
- [8] Abaqus Analysis Users Guide 2016
- [9] Hill, R.: A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals. Proceedings of the Royal Society A 193 (1948) S. 281-297
- [10] Stommel, M., Stojek, M., Korte, W.: FEM zur Berechnung von Kunststoff- und Elastomerbauteilen. München: Carl Hanser Verlag 2011
- [11] Lobo, H. u. Hurtado, J.: Characterization and Modeling of Non-Linear Behavior of Plastics. Abaqus User's Conference 2006 S. 315 - 327
- [12] Quinson, R., Perez, J., Rink, M., Pavan, A.: Components of non-elastic deformation in amorphous glassy polymers. Journal of Material Science 31 (1996) S. 4387 - 4394
- [13] Delrymple, T.: Calibration of Polypropylene Washington Penn grade PPC3TF2-Black. URL:<http://www.axelproducts.com/downloads/Calibration%20of%20Polypropylene%20PC3TF2%20using%20Abaqus%20PRF%20Model.pdf> 2014, Zugriff: 07.02.2017
- [14] Brusselle-Dupend, N., Lai, D., Feaugas, X., Guigon, M. u. Clavel, M.: Experimental Characterization and Modeling of the Uniaxial Mechanical Behavior of Polypropylene before Necking. Oil & Gas Science and Technology 57 (2002) S. 155-168

- [15] Andy Poli, A., Dajos, T., Miller, K.: Testing Plastics for Material Models in Finite Element Analysis.
URL: <http://www.axelproducts.com/downloads/TestingPlasticForFEA.pdf>, Zugriff: 07.02.2017
- [16] Bergström, J.: Mechanics of Solid Polymers. Theory and Computational Modeling. New York: Elsevier Verlag 2015
- [17] Eswaran, S. K., Kelley, J. A., Bergstrom, J. S., Virginia L. Giddings, V. L.: Material Modeling of Polylactide. 2011 SIMULIA Customer Conference
- [18] Hurtado, J.A., Lapczyk, I., Govindarajan, S.M.: Parallel rheological framework to model non-linear viscoelasticity, permanent set, and Mullins effect in elastomers. Constitutive Models for Rubber VIII (2013) S. 95-100
- [19] Galounts, E.: Experimentelle Bestimmung der Fließgrenze von Kunststoffen unter Berücksichtigung ihrer viskoelastisch- plastischen Eigenschaften. Hochschule Bonn-Rhein-Sieg Bachelorarbeit 2017

Prozessanalytische Untersuchungen zum Blasformen von Silikonkautschuk unter Einsatz eines temperierten Blaskopfs

Prof. Dr.-Ing. **C. Hopmann**, M. Eng. **S. Schäfer**,
Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV) an der RWTH Aachen, Aachen

Kurzfassung

Das Blasformverfahren bietet die Möglichkeit einer reproduzierbaren, vollautomatischen und damit kostengünstigen Massenproduktion komplexer Hohlkörper. Aufgrund der schlechten mechanischen Eigenschaften von unvulkanisierten Kautschuken konnten diese bisher nicht im Blasformen zu elastomeren Hohlkörpern verarbeitet werden. In diesem Beitrag wird gezeigt, dass mittels einer definierten Vorvernetzung des Festsilikonkautschuks im temperierten Blaskopf das Blasformen dieses Materials möglich ist.

Mit der Vorvernetzung können die mechanischen und rheologischen Werkstoffeigenschaften präzise eingestellt werden. Dies ermöglicht die Vorformlingsbildung ohne starkes Auslängen. Während des Umformens stellt die Vorvernetzung die erforderliche Elastizität des Materials sicher, gleichzeitig bleiben die Schweißbarkeit und Umformbarkeit des Materials erhalten. Die Vorvernetzung beeinflusst aber auch die rheologischen Eigenschaften des Materials. Daher wird in diesem Beitrag untersucht, wie das rheologischen Materialverhalten durch die Vorvernetzung verändert wird und inwieweit es überhaupt möglich ist, vorvernetzten Silikonkautschuk zu extrudieren. Es zeigt sich, dass die Vorvernetzung ab einem gewissen Grad zu Strömungsinstabilitäten wie Wandgleiten und Schmelzbruch führen kann, wenn zu hohe Schergeschwindigkeiten im Fließkanal erreicht werden.

Abstract

The blow moulding process offers the possibility of reproducible, fully automatic and therefore cost-efficient mass production of complex hollow bodies. Due to the poor mechanical properties of uncured rubber, it has not yet been used for the manufacturing of elastomeric hollow parts. In this contribution, it is shown that with a defined pre-cross-linking of solid silicone rubber in the blow head the blow moulding of the material is possible.

With pre-cross-linking the mechanical and rheological material properties can be adjusted precisely. This allows parison extrusion without strong drawdown. During the forming, it provides the necessary elasticity while maintaining the weldability and formability of the material.

But pre-cross-linking also influences the materials rheological properties. Therefore, this paper examines how the rheological material behaviour is changed by the pre-cross-linking and to which amount it is at all possible to extrude pre-cross-linked silicone rubber. It is shown that a certain amount of pre-cross-linking can lead to flow instabilities such as wall slippage and melt fracture when high shear rates in the flow channel are reached.

1. Potential des Blasformens von Silikonkautschuk

Silikonkautschuke haben hervorragende physikalische und chemische Materialeigenschaften wie hohe Flexibilität, einen breiten Anwendungstemperaturbereich und gute chemische Beständigkeit. Sie sind außerdem ozon- und witterungsbeständig, physiologisch inert und haben eine bakterien- und schimmelrepressive Wirkung. Sie sind flammwidrig, elektrisch isolierend und beständig gegen pflanzliches und tierisches Fett, Paraffinöl und Alkohol [1, 2]. Silikonkautschuke werden hauptsächlich in elektrischen (30% des weltweiten Marktvolumens), Automobil- (25%) und medizinischen (15%) Anwendungen eingesetzt. Der weltweite Markt für Silikonelastomere belief sich im Jahr 2014 auf ein Volumen von 6 Mrd. USD und wird von 2015 auf 2022 um schätzungsweise 5,8% wachsen. Dies resultiert aus der raschen Urbanisierung und Industrialisierung in den Schwellenländern sowie dem demografischen Wandel und dem daraus resultierenden Bedarf an Medizinprodukten [3].

Hohlkörper aus Silikonkautschuk werden beispielsweise für Verpackungen und den Transport eingesetzt oder dienen als technische Teile wie z. B. Medienleitungen oder mechanische Vorrichtungen. Sie können mittels Spritzguss oder Extrusion hergestellt werden. Beide Herstellungsverfahren sind in Bezug auf die Hohlkörperherstellung zeit- und kostenaufwendig. Da das vulkanisierte Produkt von einem Metallkern entfernt werden muss, sind die Geometrien stark begrenzt [1, 4].

Das Blasformverfahren bietet die Möglichkeit einer reproduzierbaren, vollautomatischen und damit kostengünstigen Massenproduktion komplexer Hohlkörper. Wegen der unzureichenden mechanischen und dehn-rheologischen Eigenschaften von unvernetztem Silikonkautschuk und des nicht angepassten Blasformprozesses ist das Verfahren für Silikonkautschuke noch nicht etabliert [5-7].

2. Verfabrensablauf des Blasformens von Silikonkautschuk

Am IKV wurde dieser Ansatz mit weiterentwickelten Materialsystemen und angepasster Prozessführung neu aufgegriffen [7-9]. Der Silikonkautschuk wird in einem Extruder plastifiziert und in den Blaskopf gefördert. Im Blaskopf wird der Vorformling gebildet und dieser senkrecht nach unten ausgestoßen. Anschließend wird der Vorformling vom Blasformwerkzeug

übernommen und dort gegen die beheizte Werkzeugwand aufgeblasen. Bei Kontakt mit der heißen Formwand wird die Vernetzung des Kautschuks aktiviert, die das Formteil aushärten lässt. Nach der nötigen Vernetzungszeit kann das Formteil entformt werden. Bei der Vorformlingsextrusion hängt der Vorformling im Freien und wird von seinem eigenen Gewicht ausgelängt. Das Verhalten des Vorformlings wird in diesem Prozessschritt einzig von seinen rheologischen und mechanischen Materialeigenschaften bestimmt. Das Gleiche gilt für den Aufblasvorgang: Bis zum ersten Kontakt mit dem Werkzeug wird das Umformverhalten des Vorformlings nur von seinen rheologischen und mechanischen Eigenschaften beeinflusst [10]. Der unvernetzte Festsilikonkautschuk hat aber nicht die erforderliche Schmelzfestigkeit, um bei der Vorformlingsbildung nicht zu stark auszulängen und sicher aufgeblasen zu werden. Mittels einer geringen aber gezielten Vorvernetzung, die in das Material eingebracht wird, können die Materialeigenschaften des Silikonkautschuks so verändert werden, dass sowohl die Vorformlingsbildung als auch das anschließende Aufblasen des Vorformlings möglich sind. Gleichzeitig bleiben die Formbarkeit und die Schweißbarkeit des Materials in ausreichendem Maße erhalten. Die Vorvernetzung wird über die Mischung zweier Silikonkautschukcompounds eingestellt. Die Compounds unterscheiden sich lediglich in dem Vernetzungsmittel. Ein Compound enthält ein Vernetzungsmittel (Di(2,4dichlorbenzoyl)peroxid), das die Vorvernetzung bei etwa 120 °C erzeugt und das Andere enthält ein zweites Vernetzungsmittel (Dicumyl peroxid) für die Ausvernetzung bei 180 °C. Über die Mischung der beiden Compounds kann der Grad der Vorvernetzung gezielt eingestellt werden. Die zwei Vernetzungsstufen wurden gewählt, um die Vorvernetzung prozesstechnisch sicher von der Endvernetzung trennen zu können. Die Vorvernetzung bei 120 °C findet bei oder direkt nach der Vorformlingsbildung statt und die Endvernetzung bei 180 °C im Blasformwerkzeug [11].

In vorangegangenen Untersuchungen wurde untersucht, ob die gewünschte Vorvernetzung mittels eines beheizten Blaskopfes vor der Vorformlingsextrusion oder mittels eines IR-Strahlers direkt nach der Vorformlingsextrusion erzielt werden kann. Bei Verwendung des IR-Strahlers hat sich jedoch gezeigt, dass sich das Material bei der Erwärmung durch den IR-Strahler sehr stark auslängt, da die Vorvernetzung nicht schnell genug erzeugt werden kann. Prinzipiell ist es besser die Vorvernetzung bereits im Blaskopf stattfinden zu lassen [7]. Allerdings muss dieser ein für die Vorvernetzung optimiertes Design aufweisen. Denn die Vorvernetzung des Materials während der Schlauchausformung kann im Bereich der Stege des Stegdornhalters zu Blockaden im Fließkanal führen [7].

3. Einfluss der Vorvernetzung auf die rheologische Materialeigenschaften

Ziel des laufenden Forschungsprojekts am IKV ist die Entwicklung eines Blaskopfes zur kontinuierlichen Vorvernetzung von Festsilikonkautschuk. Bis heute ist wenig über die Konstruktion von Extrusionswerkzeugen für die Vorvernetzung bekannt, da die Vernetzung von Gummi innerhalb der Extrusionswerkzeuges i. d. R. vermieden wird, um ein Verstopfen des Fließkanals zu vermeiden. Um den Blaskopf zur kontinuierlichen Vorvernetzung von Festsilikonkautschuk auszulegen, werden die rheologischen Materialeigenschaften in Abhängigkeit der Vorvernetzung benötigt. Daher wird im Folgenden untersucht, wie sich die Vorvernetzung auf die rheologischen Materialeigenschaften auswirkt.

Verwendete Methoden und Materialien

Für die folgenden Untersuchungen wurden zwei Festsilikonkautschuke von der Momentive Performance Materials GmbH, Leverkusen, und der Wacker Chemie AG, Burghausen, verwendet. Es handelt sich jeweils um hochtemperaturvernetzenden Silikonkautschuk. Im Folgenden werden die beiden Materialien aufgrund ihrer unterschiedlichen Bruchdehnung als 600M und 490W Typ bezeichnet. Die Materialeigenschaften sind in

Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1: Materialeigenschaften der verwendeten Festsilikonkautschuke [12, 13]

	600M	490W
Dichte [g/cm ³] (DIN 1183-1A)	1.15	1.17
Härte [Shore A] (DIN 53505)	60	62
Zugfestigkeit [N/mm ²] (DIN 53504 S1)	11	10
Bruchdehnung [%] (DIN 5304 S2)	600	490
Reißfestigkeit [N/mm] (ASTM D 624 B)	37	34

Das Vernetzungssystem bilden zwei verschiedene Peroxide: Dicumylperoxid (DCP) mit einer Vernetzungstemperatur von 180 °C und Di(2,4-dichlorbenzoyl)-peroxid (2,4DCBP) mit einer Vernetzungstemperatur von 120 °C. Die beiden Peroxide wurden jeweils einzeln auf einem Walzwerk am IKV in die beiden Silikonkautschuke eingemischt, sodass zwei Compounds für jeden Silikonkautschuk vorliegen. Das eine enthält 0,74 Gew.-% Di (2,4-dichlorbenzoyl) peroxid, das anderen 0,57 Gew.-% Dicumylperoxid.

Diese beiden Compounds erzeugen in Kombination aufgrund der beiden Vernetzungstemperaturen ein zweistufiges Vernetzungssystem. Durch Mischen der beiden Compounds in unterschiedlichen Gewichtsverhältnissen kann der Vorvernetzungsgrad beliebig variiert wer-

den. Im Folgenden bedeutet die Bezeichnung 6 Gew.-% Vorvernetzungscompound (VVC), dass 6 % des Materials aus dem Compound mit dem eingemischten 2,4DCBP besteht, da das Vernetzungsmittel 2,4DCBP zu einer Vorvernetzung bei 120 °C führt.

Für die rheologischen Untersuchungen wurden Messungen im Hochdruck-Kapillarrheometer (HKR) für unterschiedlich stark vorvernetzte Proben durchgeführt. Die Vorvernetzung der Proben erfolgte mit Hilfe einer Heißpresse. Dazu wurden unterschiedlich gemischte Silikonkautschuke in einer Heißpresse zu Platten gepresst und vorvernetzt. Die Abmessungen der Platten betrugen 155 x 100 x 2 mm³. Die Platten wurden bei 225 bar für 5 min bei einer Temperatur von 120 °C hergestellt. Aus diesen vorvernetzten Platten wurden Proben für die HKR-Messungen entnommen. Die vorvernetzten Proben wurden in den HKR-Probenkanal eingefüllt und bis zu erforderlichen Testtemperatur aufgewärmt. Beide Materialien wurde mit 0, 2, 4, 6, 8 und 10 Gew.-% VVC bei 50, 80 und 110 °C und bei Scherraten von 5, 8, 10, 50, 80 und 100 1/s getestet. Alle Messungen wurden an einer 10, 20 und 30 mm langen Kapillare mit einem Durchmesser von 1 mm durchgeführt, um den elastischen Druckverlust zu berücksichtigen.

Ergebnisse und Diskussion

In Bild 1 sind die Fließkurven des Materials 600M bei einer Temperatur von 110 °C für verschiedene Anteile des VVC dargestellt. Es zeigt sich ein stark strukturviskoses Verhalten des Silikonkautschuks. Tendenziell führt die Vorvernetzung zu einer Erhöhung der Viskosität bei geringen Schergeschwindigkeiten. Der Einfluss des VVC-Anteils wird für höhere Schergeschwindigkeiten geringer und die Mischung mit 0 Gew.-% VVC weist eine höhere Viskosität auf, als die Mischung mit 2 und 4 Gew.-% VVC. Das Material mit einem VVC-Anteil von 10 Gew.-% kann ein Ausreißer darstellen, da diese Mischung nicht die höchste Viskosität aufweist und bei hohen Schergeschwindigkeiten kein signifikanter Abfall der Viskosität zu beobachten ist. Die Messung des Materials mit 10 Gew.-% VVC konnte auch nicht bei allen Schergeschwindigkeiten ausgewertet werden, da der gemessene Druckverlust für alle drei Kapillarlngen gleich war.

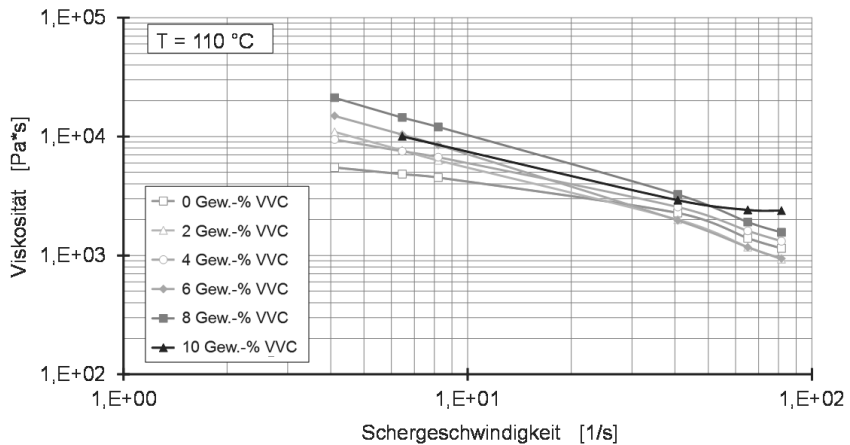


Bild 1: Fließkurven des Materials 600M in Abhängigkeit der Vorvernetzung bei einer Materialtemperatur von 100 °C.

Während eine Erhöhung des VVC-Anteils tendenziell zu einer Erhöhung der Viskosität des Materials des Typs 600M führt, zeigt Bild 2, dass die Zugabe des VVC zum Material 490W eine Verringerung der Viskosität hervorruft. Mit der Ausnahme der Mischung mit einem VVC-Anteil von 8 Gew.-% verringert sich die Viskosität mit steigendem VVC-Anteil. Die Messung des Materials mit 10 Gew.-% VVC konnte bei niedrigen Scherraten nicht ausgewertet werden, da der gemessene Druckverlust für alle drei Kapillarlängen gleich war. Für hohe Schergeschwindigkeiten haben alle vorvernetzten Materialien eine niedrigere Viskosität als das unvernetzte Material und das Material mit 10 Gew.-% VVC hat sogar die niedrigste Viskosität.

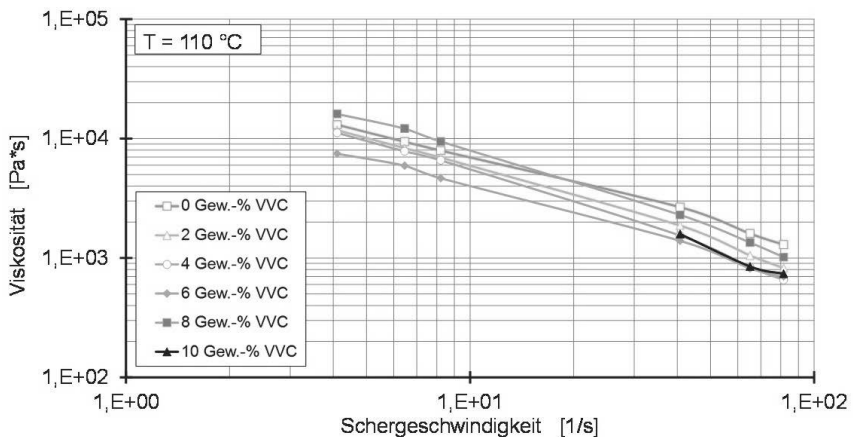


Bild 2: Fließkurven des Materials 490W in Abhängigkeit der Vorvernetzung bei einer Materialtemperatur von 110 °C.

Bei Betrachtung der HKR-Stränge des Materials 490W bei Schergeschwindigkeiten von 100 1/s zeigt sich, dass mit zunehmender Vorvernetzung die Oberfläche der Stränge zunehmend rau wird (Bild 3). Diese Beobachtung weist auf ein Wandgleiten des vorvernetzten Silikonkautschuks hin. Wandgleiten tritt auf, wenn die Wandschubspannung den für das Material kritischen Wert überschreitet. An dieser Stelle haftet das Material nicht länger an der Wand und beginnt an dieser zu gleiten. Beim Gleiten an der Wand sinkt die Schubspannung, bis die Belastung unter dem kritischen Wert liegt und das Material wieder an der Wand haftet [14]. Dieser Vorgang wiederholt sich periodisch und führt zu der beobachteten Oberflächenrauigkeit. Diese Beobachtung kann die unerwarteten Ergebnisse der HKR-Messungen erklären. Durch das Wandgleiten wird der Druckverlust im Strömungskanal verringert und die Viskositäten werden aus zu niedrigen Druckwerten berechnet. Die Tendenz des Wandgleitens nimmt für höherviskose Materialien zu. Da die Vorvernetzung unter anderem die Viskosität des Materials erhöht, sinkt die kritische Schergeschwindigkeit, ab der Wandgleiten auftritt, mit zunehmender Vorvernetzung.

Ein weiterer Effekt, der zu den unerwarteten Ergebnissen bei der HKR-Messung führen kann, ist die Temperaturerhöhung aufgrund der Schererwärmung. Die Vorvernetzung erhöht die Viskosität, was zu höheren Schergeschwindigkeiten führt, die das Material stärker erwärmen. Dadurch ist die Materialtemperatur, bei der die HKR-Messung durchgeführt wird, in Wirklichkeit höher als eingestellt. Dies kann zur Messung einer geringeren Viskosität trotz

höherem Vernetzungsgrad führen. Dieser Effekt wird in HKR-Messungen vernachlässigt, da er nicht leicht zu detektieren ist [15].

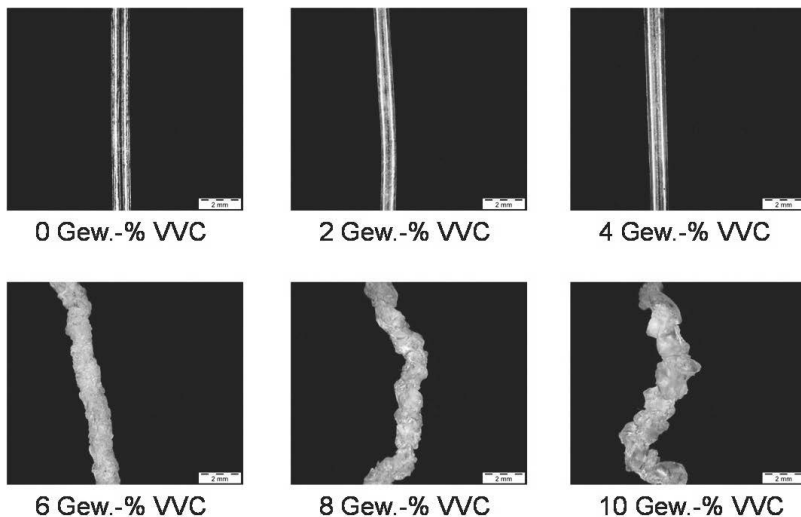


Bild 3: HKR-Stränge des Materials 490W bei unterschiedlichen Vorvernetzungsgraden.

4. Temperierter Blaskopf zur Verarbeitung von Silikonkautschuk

Die zum Blasformen von Festsilikonkautschuk nötige Vorvernetzung findet im Blaskopf statt, da das Material bei der Vorformlingsbildung bereits vorvernetzt sein sollte. Ansonsten längt es sich zu stark aus und wird zu dünnwandig für die anschließende Ausformung. Damit das vorvernetzte Material den Fließkanal nicht blockiert, dürfen in dem Bereich, in dem das Material vernetzt, keine großen Unterschiede in der Strömungsgeschwindigkeit über dem Querschnitt auftreten und insbesondere keine Totwassergebiete entstehen. Daher wird im Blaskopf zunächst der Schlauch mit unvernetztem Material ausgeformt. Daran anschließend folgt ein Bereich mit konstanter Fließkanalhöhe und –querschnitt, in dem die Vorvernetzung des Silikonkautschuks stattfindet (Bild 4). Daher sind diese zwei Bereiche thermisch getrennt. Der obere Bereich der Schlauchausformung ist mittels Wasser gekühlt, sodass keinerlei Vernetzung stattfindet. Die Zone der Vorvernetzung wird mittels Öl und Heizband beheizt. Anschließend folgt die Düse, die mit einer axialen Wanddickensteuerung ausgestattet ist. Auch diese ist beheizt, damit die Vorvernetzung abgeschlossen wird und das Material nicht abkühlt.

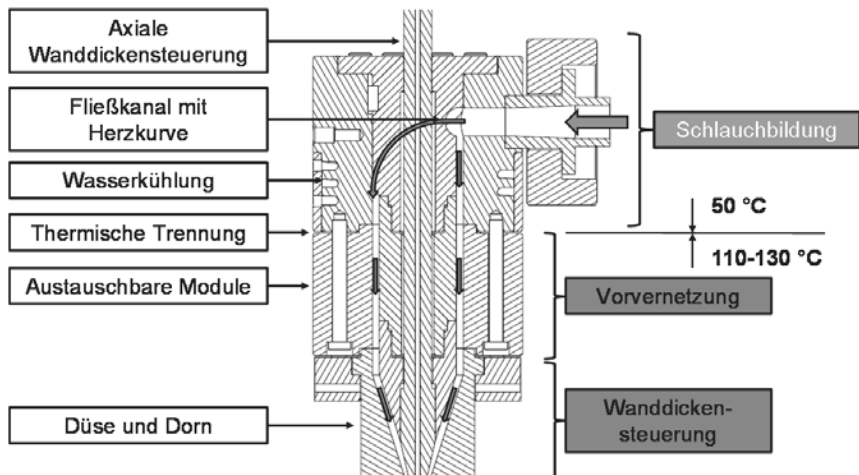


Bild 4: Konzeptzeichnung des temperierten Blaskopfes zur Vorvernetzung von Festsilikonkautschuk

Die Ergebnisse der HKR-Messungen wurden verwendet, um den Fließkanal des Blaskopfes auszulegen. Aus dem gemessenen Viskositätskurven wurden diejenigen ausgewählt, die dem zu erwartenden Materialzustand entsprechen. Im Bereich der Schlauchausformung wird das Material eine Temperatur von 50 °C haben. Anschließend beginnt die Erwärmung und zunehmende Vernetzung des Kautschuks. Am Werkzeugaustritt wird das Material eine Temperatur zwischen 110 und 120 °C und eine Vorvernetzung von 8 Gew.-% VVC aufweisen. Eine Vorvernetzung mit einem VVC-Anteil von 10 Gew.-% wurde ausgeschlossen, da bei diesem Grad der Vorvernetzung von Schmelzebruch auszugehen ist. In Bild 5 sind die ausgewählten Fließkurven für das Material 600M dargestellt.

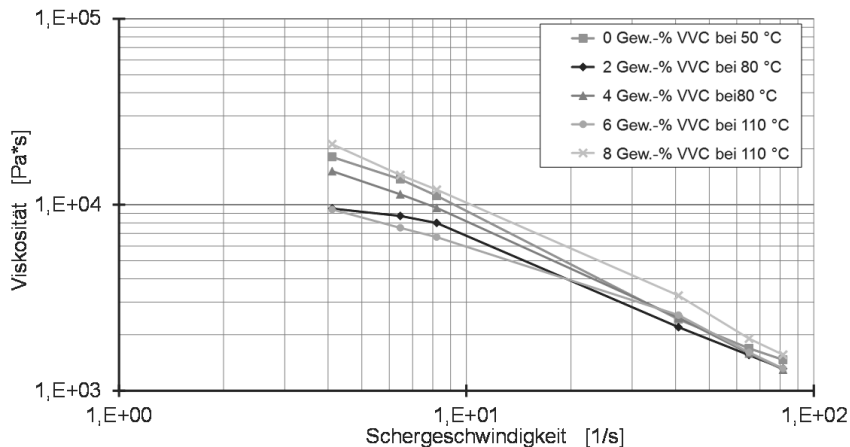


Bild 5: Fließkurven des Materials 600M bei ausgewählten Temperaturen und Vernetzungsgraden.

Bild 5 zeigt den Einfluss der Prüftemperatur und des VVC-Anteils auf die Viskosität. Die Temperatur hat grundsätzlich zwei gegenläufige Einflüsse: Mit steigender Temperatur sinkt die Viskosität aufgrund der Erwärmung, aber mit steigender Temperatur steigt sowohl die Vernetzungsgeschwindigkeit als auch der dabei entstehende Vernetzungsgrad und somit erhöht sich die Viskosität. Dies wird auch in den Ergebnissen deutlich: Bei 80 °C liegt bei einem VCC-Anteil von 4 Gew.-% die Viskosität höher als bei einem VVC-Anteil von 2 Gew.-%, da angenommen werden kann, dass ein höherer Vernetzungsgrad vorliegt. Die Viskosität beider Mischungen liegt jedoch unterhalb der Referenzprobe (0 Gew.-% VVC) bei 50 °C, da die beiden Mischungen eine geringere Viskosität aufgrund der höheren Temperatur aufweisen. Diese Tendenzen sind auch bei 110 °C zu beobachten. Bei einem VVC-Anteil von 6 Gew.-% VVC liegt die geringste Viskosität vor. Eine Erhöhung des VVC-Anteils auf 8 Gew.-% erhöht deutlich die Viskosität, da ein höherer Vernetzungsgrad erzielt werden kann.

Da die Viskositätsänderungen höchstens in einem Bereich zwischen 1000 Pas bewegen und die Übergänge fließend sind, ist es nicht erforderlich den Fließkanalquerschnitt an die sich ändernde Viskosität anzupassen.

5. Prozessanalytische Untersuchungen des Umformverhaltens

Mittels des temperierten Blaskopfes ist es möglich kontinuierlich vorvernetzte Vorformlinge aus Silikonkautschuk herzustellen. Im Folgenden wird untersucht, wie sich die Vorvernetzung auf die das Umformverhalten beim Aufblasen des Vorformlings auswirkt.

Verwendete Methoden und Materialien

Die Umformuntersuchungen wurden mit dem Material 600M durchgeführt. Als Vorvernetzung wurde ein Anteil von 8 Gew.-% VVC gewählt. Die Vorformlingsbildung und Vorvernetzung wurde mit einem temperierten Blaskopf der Firma W. Müller GmbH, Troisdorf, durchgeführt. Die Prozessparameter sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Prozessparameter der Vorformlingsbildung

Parameter	Werte
Massedurchsatz [kg/h]	1
Extrudertemperatur [°C]	60
Heizband Blaskopf Mitte [°C]	75
Heizband Blaskopf Düse [°C]	110
Öltemperierier Vorlauf [°C]	150
Massetemperatur Vorformling [°C]	104

Der Vorformling wurde direkt nach der Extrusion mittels Druckluft von 0,2 bar aufgeblasen. Die dabei entstehende Formänderung wurde aufgezeichnet.

Ergebnisse und Diskussion

In Bild 6 sind die Radien des Vorformlings nach dem Aufblasen über der Länge des Vorformlings dargestellt. Dies zeigt die unterschiedlichen Formen, die sich je nach Vernetzungszustand des Materials oder Umformbedingungen beim Aufblasen des Vorformlings ergeben. Das unvernetzte Material formt nur eine kleine Blase aus, die sehr schnell lokal ausdünnst und einreißt. Bereits eine Vorvernetzung von 8 Gew.-% VVC reicht aus, um dieses Verhalten zu verbessern. Zunächst wurde der Vorformling frei, ohne Begrenzung, aufgeblasen. Der vorvernetzte Vorformling lässt sich sehr gleichmäßig aufblasen. Es entsteht eine kugelhähnliche Form. Auch beim freien Aufblasen wird der Vorformling zunehmend dünner und wird schließlich einreißen. Daher wurde das Aufblasen des Vorformlings bei einem Umformgrad von 1:3,45 abgebrochen (Radius = 34,5 mm).

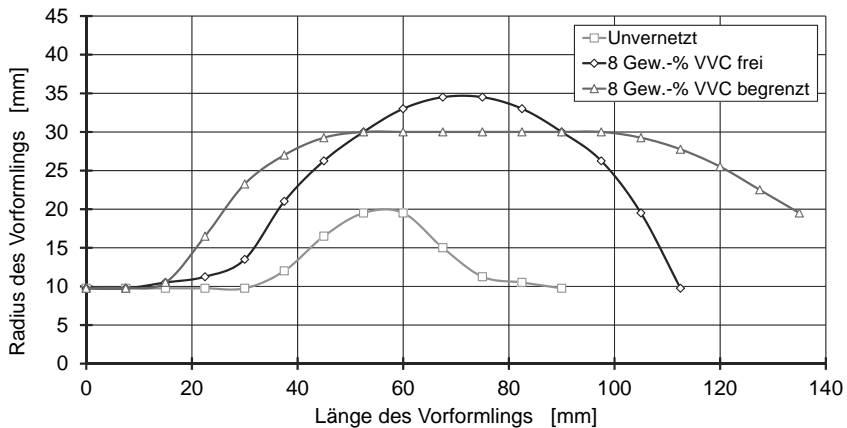


Bild 6: Umformverhalten des unvernetzten und des vorvernetzten Vorformlings bei freier und begrenzter Umformung

Die Begrenzung der freien Ausdehnung des Vorformlings ermöglicht es, das Umformverhalten des Vorformlings zu steuern und größere Bauteile auszuformen. Für die Untersuchungen wurde ein äußerer Durchmesser von 60 mm vorgegeben. Sobald der erste Teil des Vorformlings die Form berührt, setzt sich die Umformung in axialer Richtung fort, zu erkennen an dem Plateau des Kurvenverlaufs des begrenzten Vorformlings. Dieses Verhalten entspricht dem typischen Umformverhalten von Thermoplasten, die im Blasformen eingesetzt werden [16, 17].

6. Zusammenfassung und Ausblick

Das Blasformen kann die Wirtschaftlichkeit der Herstellung von komplexen Hohlkörpern aus Festsilikonkautschuk verbessern und neue Anwendungsgebiete erschließen. Für die Verarbeitung beim Extrusionsblasformen muss der Silikonkautschuk eine ausreichende Stabilität aufweisen, um in seine endgültige Form geblasen zu werden. Diese Stabilität wird von dem unvernetzten Kautschuk nicht bereitgestellt. Mit einem geringen Grad an Vorvernetzung kann das Material aber genügend Stabilität erhalten, um im Blasformen verarbeitet zu werden. Um die Vorvernetzung des Silikonkautschuks prozesstechnisch umzusetzen wurde ein in zwei Zonen temperierter Blaskopf entwickelt. Die Untersuchungen in diesem Beitrag, zeigen dass es möglich ist, vorvernetztes Material bis zu einem gewissen Vernetzungsgrad zu extrudieren. Dabei muss aber darauf geachtet werden, dass keine zu starke Vorvernetzung des Materials entweder durch falsches Mischen oder zu hohe Temperaturen im Blaskopf

erzeugt wird. Sonst kann es zunächst zu Wandgleiteffekten und Schmelzebruch und anschließend zu einem Verstopfen des Fließkanals kommen.

In folgenden Untersuchungen wird das Schwell- und Auslängverhalten des Vorformlings in Abhängigkeit der Vorvernetzung untersucht. Anschließend wird das Umformverhalten in Abhängigkeit der Vorvernetzung und der Prozessparameter beim Aufblasen des Vorformlings analysiert. Ziel der Untersuchungen ist es, die Möglichkeiten und Grenzen des Verfahrens sowie die erzielbaren Bauteileigenschaften zu ermitteln.

Dank

Das IGF-Forschungsvorhaben 18911 N der Forschungsvereinigung Kunststoffverarbeitung wird über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Allen Institutionen gilt unser Dank.

Ebenso gilt unser Dank den Firmen Momentive Performance Materials GmbH, Leverkusen, und Wacker Chemie AG, München, die diese Arbeiten mit Materialspenden unterstützt haben.

Literatur

- [1] Röthemeyer, F. and F. Sommer, *Kautschuk Technologie*. 2. ed. 2006, München, Wien: Carl Hanser Verlag.
- [2] Holleman, A.F., E. Wiberg, and N. Wiberg, *Lehrbuch der anorganischen Chemie*. 1995, Berlin [u.a.]: de Gruyter. XXXIX, 2033 S. : Ill., graph. Darst. + 6 Taf.
- [3] N.N. *Silicone Elastomers Market To Reach \$10.02 Billion By 2022*. 21.09.2016 [cited 2016 21.09.2016]; Siliconmarkt].
- [4] Küddelsmann, K., *Vom Krümmer zum verzweigten Schlauchsystem*, in *Technische Problemlösungen mit Elastomeren*, V.G.K. Verein Deutscher Ingenieure, Editor. 1992, VDI-Verlag: Düsseldorf.
- [5] Lynch, W., *Handbook of Silicone Rubber Fabrication*. 1978, New York, London: Van Nostrand Reinhold.
- [6] N.N., *Verfahren zur Herstellung von Hohlkörpern aus vulkanisierten Elastomeren*. 1975: Deutsches Patent- und Markenamt.

- [7] Hopmann, C. and S. Schäfer, *Blasformen von Silikonkautschuken - Innovative Prozesstechnik zur Herstellung elastomerer Hohlkörper* *Blow molding of silicon rubbers - Innovative process technology for the production of elastomeric hollow parts*. Kautschuk, Gummi, Kunststoffe, 2015. **68**(7): p. 32-38.
- [8] Hopmann, C., S. Schäfer, and A. Funk, *Blow moulding of silicone rubber using platinum catalyzed curing systems and investigation of the pinch-off weld formation*, in *KHK 11th Fall Rubber Colloquium*. 2014: Hannover.
- [9] Hopmann, C., et al., *Blasformen von Silikonkautschuken – Ein innovativer Ansatz zur Herstellung elastomerer Hohlkörper*, in *Tagungsumdruck zum 27. Internationalen Kolloquium Kunststofftechnik*. 2014, Shaker: Aachen. p. S. 18/21–39.
- [10] Ariawan, A.B., et al., *Effects of molecular structure on the rheology and processability of blow-molding high-density polyethylene resins*. *Advances in Polymer Technology*, 2001. **20**(1): p. 1-13.
- [11] Hopmann, C. and S. Schäfer, *Blasformen von Silikonkautschuken. Entwicklung und Erprobung einer innovativen PROzesstechnik*, in *VDI-Fachtagung Blasformen 2015*. 2015, VDI-Verlag: Düsseldorf.
- [12] N.N. *Momentive Performance Materials Addisil™ 2060 E Industrial Extrusion Heat Cured Rubber* 2017; Available from:
<http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=a26dfeff3735427cb8f1d34ffb7bf4f5>.
- [13] N.N. *ELASTOSIL® R 402/60*. 2016; Available from:
<https://www.wacker.com/cms/de/products/product/product.jsp?product=13143>.
- [14] Michaeli, W., *Extrusionswerkzeuge für Kunststoffe und Kautschuk*. 2009, München: Hanser. XV, 432 S. : Ill., zahlr. graph. Darst.
- [15] Gebauer, T. *High-pressure capillary rheometer, Accuracy of established measuring techniques*. in *KHK2016*. 2016. Hannover, Germany.
- [16] Ryan, M.E. and A. Dutta, *The dynamics of parison free inflation in extrusion blow molding*. *Polymer Engineering & Science*, 1982. **22**(9): p. 569-577.
- [17] Wagner, A.H. and D.M. Kalyon, *Parison formation and inflation behavior of polyamide-6 during extrusion blow molding*. *Polymer Engineering & Science*, 1996. **36**(14): p. 1897-1906.

3D-Printing – Funktionsintegration durch 3D-Druck im Werkzeugbau

Dipl.-Ing. (FH) **G. Hofmann**,
Werkzeugbau Siegfried Hofmann GmbH, Lichtenfels

Kurzfassung

Ein etabliertes 3D-Druck-Verfahren ist das Laserschmelzen von Metallen. Seit 15 Jahren werden Formeinsätze für Spritzgusswerkzeuge mit diesem Verfahren hergestellt.

Mit optimierter Kühlung können die Kühlzeiten bis zu 50 % reduziert werden. Durch die Freiheit, die der 3D-Druck bietet, ist die Integration von zusätzlichen Funktionen wie Luftausstoßer, Entlüftungen oder elastische Trennungen ohne Mehrkosten möglich.

Neben dem Einsatz in Spritzgusswerkzeugen eignet sich diese Technik hervorragend für Prozesse mit im Vergleich niedrigen Forminnendrücken, wie die Konsolidierung von Faserverbundwerkstoffen. Auf Grund der geringen Drücke können sie gewichtsoptimiert und damit kostengünstiger hergestellt werden. Ebenso können auf Grund der geringen Masse variotherme Prozesse dynamischer und energieeffizienter gefahren werden.

Abstract

Selective laser melting is an established process for the 3D printing of metals. For the last 15 years inserts for injection molding tools have been manufactured with this process.

With optimized cooling channels the cooling time can be reduced about 50 %. Due to the great design freedom of the 3D-printing process it is possible to integrate additional functionalities inside the tool, like air ejectors, ventilation and elastic parting lines.

Beside the use in injection molding tools, 3D-printed inserts are used for manufacturing processes with low cavity pressures like the compression molding of fiber reinforced plastics. Due to the low processing pressure the weight of the inserts can be reduced significantly which leads to lower manufacturing costs and more dynamic and energy efficient alternating temperature processes.

1. Einleitung

Der 3D-Druck im Allgemeinen erlebte in den letzten Jahren einen großen Aufschwung. Es wurden viele neue Verfahren entwickelt und auch viele Ideen zu innovativen Produkten umgesetzt. Vom 3D gedruckten Gebäude bis hin zur Pizza. Es gibt nichts, was nicht möglich wäre.

Ein etabliertes Verfahren im Bereich Metall 3D-Druck ist die Laserschmelztechnologie. Hier werden mittels eines Lasers und Metallpulver, Schicht für Schicht, Bauteile aufgebaut. Die Eigenschaften dieser Werkstücke gleichen denen der mit herkömmlichen Stählen und konventionellen spanenden oder fräsenden Verarbeitungsverfahren hergestellten Produkte. Die Einsatzgebiete sind Luft- und Raumfahrt, Medizintechnik, Zahntechnik, Schmuckindustrie, Maschinenbau und der Fahrzeugbau.

Die erste Maschine für das Laserschmelzen von Metallen wurde von der Firma Concept Laser GmbH im Jahr 2001 auf der Euromold in Frankfurt vorgestellt. Entwickelt wurde diese Maschine für Formeinsätze mit konturnaher Kühlung für Spritzgussformen.

2. Evolution der Kühlkanäle

Mit den Möglichkeiten des 3D-Drucks hat sich die Temperierung von Werkzeugen in den letzten 15 Jahren wesentlich verändert. Anfangs wurde die Technologie zum „um die Ecke bohren“ genutzt, wodurch Dome und Einsätze, welche in die Schmelze eintauchen, auch mit konturnahen Kanälen versehen werden konnten.

Mittlerweile werden häufig nicht mehr einzelne Kanäle, sondern Parallel- oder Flächenkühlungen eingesetzt. Diese gewährleisten trotz relativ kleiner Durchmesser der einzelnen Kanäle einen niedrigen Druckabfall von Zulauf zu Ablauf. Damit können selbst mit geringen Pumpenleistungen große Volumenströme im Einsatz gewährleistet werden. Die Entwicklung geht dahin, bisher massiv gefertigte Bereiche der Formeinsätze hohl zu bauen und nur noch mit filigranen Stützstrukturen zu versehen, welche auf die im Prozess auftretenden Drücke ausgelegt sind.



Bild 1: „Um die Ecke bohren“

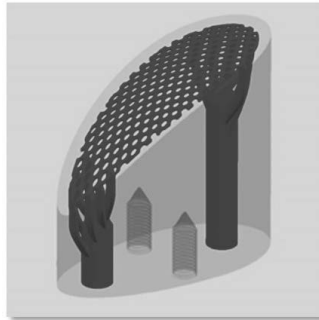


Bild 2: Effektive Flächenkühlung

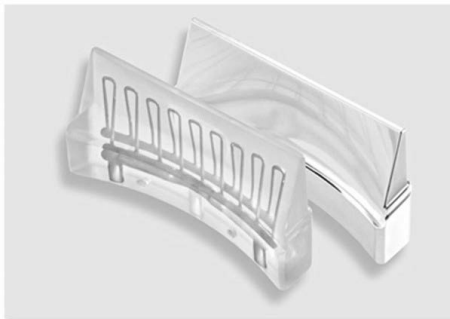


Bild 3: Parallelkühlung

3. Hybridbauweise

Um nur ausgewählte Bereiche eines Formeinsatzes generativ aufbauen zu müssen, wurde die Hybridtechnik entwickelt. Die Abbildungen 6-8 zeigen einen beispielhaften Aufbau eines Hybrid-Formeinsatzes.

- Patentiertes Verfahren
- LaserCUSING auf konventionell gefertigten Unterbau
- Enorme Zeit- und Kosteneinsparung
- Sehr geringe Eigenspannungen

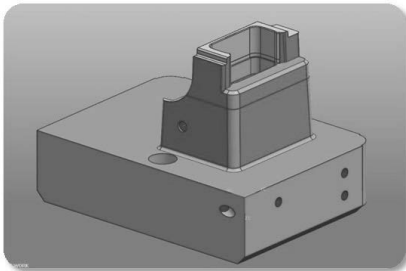


Bild 4: Kompletter Formeinsatz

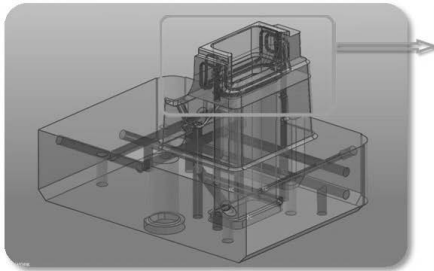


Bild 5: Kompletter Formeinsatz mit Kühlung

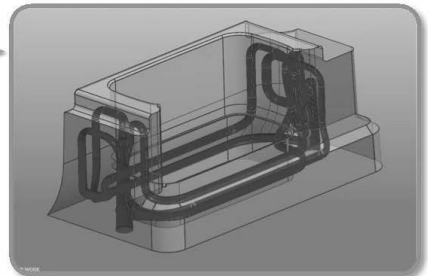


Bild 6: Hybrider Teileinsatz

Da nur ein geringer Teil des Einsatzes über additive Verfahren gefertigt werden muss, verkürzt sich die Bauzeit signifikant. Das stochastische Belichtungsverfahren der LaserCusing®-Technologie, welches die Laserenergie während des Bauvorganges über die komplette Fläche des Einsatzes verteilt, hilft die Eigenspannungen zu minimieren.

5. Integrierte Luftauswerfer

Neben der stetigen Optimierung der Temperierung von generativ gefertigten Werkzeugein-sätzen, bietet der 3D-Druck viele Möglichkeiten zur zusätzlichen Funktionsintegration. Dazu gehören auch Auswerfer, welche über Druckluft betrieben werden und keine mechanischen bzw. beweglichen Komponenten benötigen.

Über ein spezielles Belichtungsverfahren wird eine poröse Struktur im Einsatz erzeugt. Mit Hilfe dieser Mikrokanäle kann Luft durch das Metall gedrückt oder gezogen werden, hochvis-kose Kunststoffschmelzen dringen jedoch nicht in die Struktur ein. Damit können zum einen Bauteile aus dem Werkzeug entformt werden, zum anderen kann über diese Bereiche selbst in filigranen Rippenbereichen entlüftet werden, es kann Vakuum gezogen oder Einlegeteile flächig gehalten werden. Die Funktionalität der porösen Bereiche konnte bereits über Ver-suchswerkzeuge bestätigt werden. Diese Strukturen wurden innerhalb der Forschungspro-jekte DaLas (KF20258001LL8) und Inside (KF2025806MU1) entwickelt, welche vom AIF betreut und durch das Bayerische Ministerium für Wirtschaft und Energie innerhalb des „Zent-ralen Innovationsprogramm Mittelstand“ gefördert wurden.

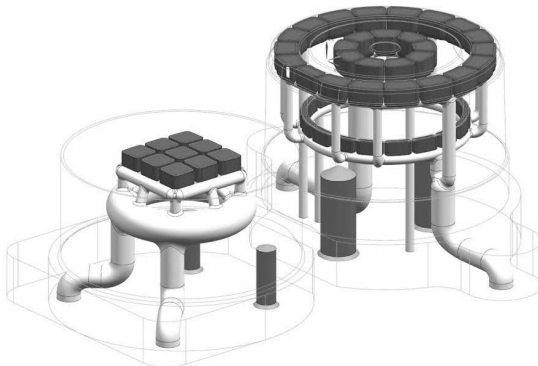


Bild 7: Formeinsatz mit lasergeneriertem Ausstoßer

6. Elastische Trennung

Vor allem bei der Verarbeitung von sehr niedrigviskosen Kunststoffen wie Polyurethan kommt es häufig zu Herausforderungen im Bereich der Trennebene der Werkzeugkavität. Durch die niedrige Viskosität fließt der Kunststoff in die Trennung und es kommt zu Gratbildung am Bauteil. Auch eine Erhöhung der Schließkraft führt meist zu keiner Verbesserung. Durch eine Vergrößerung der Elastizität und der Flächenpressung im Trennungsbereich, kann die Neigung zur Gratbildung signifikant reduziert werden. Dies wird möglich, indem im Einsatz Hohlstrukturen eingebracht werden, welche durch ihre Geometrie wie eine Feder wirken. Auf diese Weise kann durch ein Übermaß die Vorspannung erzeugt werden, während der Stahl in der Trennebene bei Schließkraft nur im elastischen Bereich belastet wird.



Bild 8: Ausschnitt eines Formeinsatzes mit elastischer Trennung

7. Konsolidierungswerkzeuge für thermoplastische Faserverbundwerkstoffe

Vor allem für Anwendungen außerhalb des Spritzgießens, bei welchen prozessbedingt nur geringe Forminnendrucke entstehen, bietet die generative Fertigung herausragende Vorteile. Die ersten masseoptimierten Formeinsätze wurden innerhalb des Forschungsprojektes In-ProLight (FKZ: 02PJ2074) entwickelt. Das Projekt wurde betreut durch den Projektträger Karlsruhe und gefördert durch das Bayrische Ministerium für Bildung und Forschung.

In diesem Forschungsprojekt wurde eine Prozesskette für ressourcenschonende Herstellung von Leichtbauteilen aus thermoplastischen Faserverbundwerkstoffen für die Automobilindustrie entwickelt. Im ersten Schritt wird über das sogenannte „3D-Fasersprühen“ eine Preform aus Hybridgarn hergestellt. Dabei wird ein Misch-Roving aus Polyamid und Glasfasern geschnitten und über einen heißen Luftstrom auf ein Drahtgeflecht gesprüht. Die Temperatur des Luftstromes ist so eingestellt, dass die Polymermatrix teilweise aufschmilzt und damit einen für die weitere Verarbeitung ausreichenden Zusammenhalt der Preform bewirkt.



Bild 9: Preform aus fasergesprühten Hybridgarn

Anschließend wird die Preform in ein Konsolidierungswerkzeug mit konturnah temperierten Einsätzen eingelegt. Das Werkzeug wird geschlossen und auf eine Verarbeitungstemperatur von ca. 260 °C aufgeheizt. Dadurch schmilzt das Matrixmaterial auf, die Fasern werden imprägniert und das Bauteil wird mit einem Prozessdruck von ca. 20-30 bar konsolidiert. Das Werkzeug wird anschließend auf Entformungstemperatur abgekühlt und das fertige Bauteil kann entnommen werden.

Um eine Zykluszeit von unter 180 s erreichen zu können, war es notwendig die dynamische Masse der temperierten Einsätze so weit wie möglich zu reduzieren. Die flächige Temperierkanalstruktur befindet sich nur wenige Millimeter unterhalb der Kavitätsoberfläche und der hintere Teil des Einsatzes wurde fast vollständig, bis auf eine filigrane Stützstruktur, ausgehöhlt. Die Stützstrukturen wurden so ausgelegt, dass Sie gerade den im Prozess auftretenden Druck, mit einer gewissen Sicherheit, standhalten.

Mit einem Thermalöl als Wärmeträger konnten auf diese Weise Temperaturen über 250 °C und Aufheizraten von bis zu 10 K/s erreicht werden.

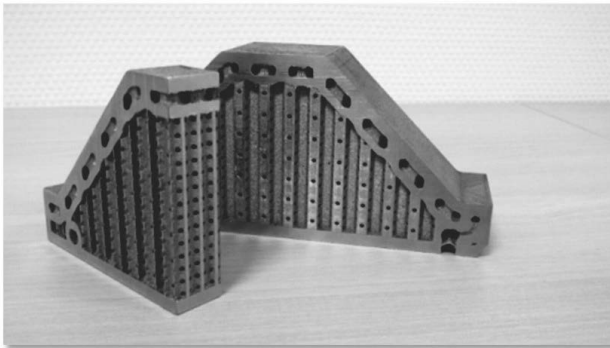


Bild 10: Masseoptimierter Einsatz

8. Zukünftige Potentiale und Ausblick

Der 3D-Druck hat sich zur Erstellung von Einsätzen mit konturnaher Temperierung für Spritzgusswerkzeuge fest etabliert. Ebenso lassen sich in Formeinsätze noch weitere Funktionen, wie z.B. Mikrokanäle als Druckluftauswerfer integrieren. In Verbindung mit kontinuierlich steigenden Bauraten und stetig wachsenden Baukammern, vergrößern sich die Möglichkeiten immer weiter, während die Kosten für den Aufbau sinken.

Dies bietet auch ein großes Potential für den Einsatz des metallischen 3D-Druckes für Blasformen. Hochdynamische Temperierungen in den Werkzeugen können einen großen Einfluss auf Zykluszeiten haben. Über poröse Strukturen lassen sich Entlüftungen an sonst nicht zugänglichen Stellen im Werkzeug einbringen. Und über die konstruktiven Möglichkeiten, die der generative Aufbau von Metallen bietet, kann das Gewicht der Formeinsätze bei gleicher mechanischer und thermischer Belastbarkeit signifikant reduziert werden.

Sind selektiv lasergeschmolzene Blasköpfe eine Option für die Zukunft?

Dr.-Ing. **H. Groß**, Dr. Groß Kunststoff-Verfahrenstechnik, Roßdorf;
S. Groß, GroKo, Roßdorf;
J. M. Nobrega, J. P. O. Vidal,
i3N/IPC, University of Minho, Guimaraes, Portugal

Kurzfassung

Mit dem selektiven Laserschmelzverfahren lassen sich metallische Bauteile mit einer Geometrie herstellen, wie sie mit den bekannten abtragenden Fertigungsmethoden nicht herstellbar sind. Erste gefertigte und getestete Komponenten bestätigen, dass mit lasererschmolzenen Teilen die verfahrenstechnischen Möglichkeiten beim Extrusionsblasformen erweitert werden. Obwohl das Fertigungsverfahren noch in den „Kinderschuhen“ steckt, steht zu erwarten, dass es nicht mehr lange dauert bis erste lasererschmolzene Komponenten im Blasformbereich verwendet werden.

1. Einleitung

Generative Fertigungsverfahren wurden ursprünglich entwickelt, um schnell Anschauungsmuster und Prototypen aus duromeren oder auch thermoplastischen Kunststoffen produzieren zu können, ohne dass dafür teure Werkzeuge benötigt werden. Inzwischen beschränken sich die generativen Fertigungsverfahren aber nicht mehr nur auf die Fertigung von Prototypen aus Kunststoff. Längst werden bereits Teile aus unterschiedlichen Metallen bzw. Legierungen hergestellt. So lassen sich komplexe Bauteile schnell und quasi abfallfrei herstellen. Das hat dazu geführt, dass es bereits mehrere Anwendungsbereiche gibt, in denen Kleinserien generativ hergestellt werden. Es sind allerdings sowohl auf Seiten der Fertigungsanlagen als auch im Bereich der potenziellen Anwendungsgebiete noch zahlreiche Hürden aus dem Weg zu räumen, um die Fertigungsmethode als allgemein anerkanntes Fertigungsverfahren neben den bestehenden und bewährten konventionellen, meist spanabhebenden Fertigungsverfahren etablieren zu können [1,2].

2. Grenzen konventionell hergestellter Blasformköpfe

Kopfkonstruktionen, die momentan beim Blasformen Stand der Technik sind, wurden so ausgeführt, dass sie mit Hilfe der Fertigungsverfahren herstellbar sind, die seit Jahrzehnten bekannt sind. Dabei wird ausgehend von einem massiven Rohling gezielt Material abgetragen, um zu der gewünschten Geometrie des benötigten Bauteils zu kommen. Dies geschieht in der Regel spanabhebend oder auch funkenerosiv. Im Verlauf vieler Jahre wurden die Konstruktionen optimiert, so dass inzwischen ein extremer Aufwand betrieben wird, um noch minimale Fortschritte erreichen zu können. Deshalb existieren inzwischen fast unüberwindbare Grenzen, wenn beispielsweise Verweil- oder Farbwechselzeiten weiter verkürzt werden sollen. Das Gleiche gilt, wenn versucht wird Köpfe zu konzipieren, die weniger Einzelteile besitzen, oder solche, mit denen die Homogenität der Schmelze verbessert wird. Es sind, wenn überhaupt, meist nur noch marginale Fortschritte erreichbar. Wirklich grundlegende Verbesserungen sind allerdings oft realisierbar, wenn man die Grenzen der herkömmlichen Fertigungsmethoden entscheidend überwindet.

3. Erweiterte Fertigungsmöglichkeiten durch generative Verfahren

Die generativen Fertigungsverfahren unterscheiden sich nun grundlegend von den konventionellen spanabhebenden Fertigungsverfahren, die im Allgemeinen bisher für die Herstellung von Blasköpfen verwendet werden. Es wird nicht mehr von einem massiven Rohling ausgegangen, aus dem dann ein mehr oder weniger großer Teil der Masse durch Materialabtrag entfernt werden muss, um zu der benötigten Geometrie zu kommen. Bei generativen Fertigungsverfahren wächst die erforderliche Geometrie langsam, indem lediglich dort Material entsteht, wo es das jeweilige Formteil auch erfordert. Mit Hilfe dieser grundlegend veränderten Vorgehensweise ergeben sich automatisch auch Gestaltungsmöglichkeiten, die es bisher nicht gab. Mit der selektiven Laserschmelztechnik (Selective Laser Melting Technologie [SLM]) können bestehende Restriktionen, die bei der Auslegung eines Extrusionswerkzeugs bisher im Wege standen, überwunden werden. Das wiederum kann genutzt werden, um vorhandene Schwächen von aktuellen Blaskopfkonstruktionen zu beseitigen oder wenigstens abzumildern. Nachfolgend werden stichwortartig Vorteile, die bei einer generativen Fertigung realisierbar sind, aufgezählt:

- Bau von Köpfen mit einem geringeren Gewicht
- Weniger Einzelteile und Trennebenen in einem Blaskopf durch die Integration mehrerer Funktionen in ein einziges Bauteil
- Geringere Störanfälligkeit und verminderter Wartungsaufwand
- Kürzere Aufheizzeiten, geringerer Energieverbrauch durch weniger Massen, die aufgeheizt werden müssen
- Kürzere Verweilzeiten und engeres Verweilzeitspektrum der Schmelze im Blaskopf
- Es können komplexe Einbauten wie beispielsweise Mischelemente in den Fließkanal eines Blaskopfes integriert werden
- Mischelemente oder Siebe können gleichzeitig als Stegdornhalter fungieren
- Kürzere und fließtechnisch günstiger gestaltete Vorverteilersysteme sind möglich
- Die Schmelze kann in der Düse homogenisiert werden

Natürlich gibt es keine Technologie, die nur Vorteile besitzt, was auch für das Laserschmelzen gilt. Nachfolgend einige für den Bau von Blasköpfen kritische Aspekte, die mit dem SLM-Verfahren verbunden sind:

- Der lasergeschmolzene Blaskopf kann nur noch pyrolytisch gereinigt werden
- Es sind keine Konstruktionserfahrungen vorhanden
- Unsichere oder nicht vorhandene mechanische Werkstoffkenndaten
- Nachträgliche Korrekturen der Fließkanalgestaltung im Inneren des Werkzeugs sind meist nicht möglich
- Keine Praxiserfahrungen bzw. Langzeiterfahrungen in der Produktion vorhanden
- Die Fließkanalwände im Inneren des Kopfes besitzen eine Oberflächenrauheit (zurzeit minimal erreichbarer Wert: $r_a = 50 \mu\text{m}$)
- Es können keine polierten Fließkanaloberflächen direkt erzeugt werden
- Fließkanaloberflächen können nach dem Reinigen nicht poliert werden
- Unsicherheit, mit welcher Präzision wichtige geometrische Vorgaben erreicht werden können
- Innere Werkzeugabmessungen können nur mit großem Aufwand (z. B. MRT) überprüft werden

Obwohl beide Listen bereits relativ lang sind, wird nicht der Anspruch erhoben, dass sie vollständig sind. Es gibt sicherlich noch weitere Aspekte, um die die Listen erweitert werden könnten.

4. Neue Gestaltungsmöglichkeiten durch Verwendung des Laserschmelzverfahrens

Durch das generative Aufbauen ergeben sich neue Gestaltungsmöglichkeiten, die bisher dem Konstrukteur mit den konventionellen Fertigungsverfahren nicht zur Verfügung standen. Besonders interessant für die Auslegung von Blasformköpfen ist es, im Inneren eines kompakten Werkstücks Kanalsysteme mit einer komplexen Geometrie realisieren zu können. Aber auch die Möglichkeit, in die Fließkanäle Einbauten mit einer nahezu beliebigen Geometrie integrieren zu können, ist neu. Vorteilhaft ist dabei zusätzlich, dass die Einbauten stoffschlüssig mit der Wand des Fließkanals verbunden werden können, was dem Konstrukteur völlig neue Gestaltungsmöglichkeiten für Blasformköpfe eröffnet, um das Betriebsverhalten der Köpfe weiter verbessern zu können.

So lassen sich zukünftig Trennebenen in Blasköpfen vermeiden, da es nicht mehr länger erforderlich ist, ein Bauteil zu teilen, um im Inneren einen Kanal mit einem gekrümmten Verlauf realisieren zu können. Auch der Zwang mit dem Verlauf eines Kanalsystems innerhalb der Trennebene zu verbleiben, existiert bei einer generativen Fertigung nicht mehr.

Die Perspektiven, die das generative Fertigungsverfahren für den Bau von Komponenten für das Blasformen bietet, sind so überzeugend, dass es lohnenswert erschien, erste Schritte zur Erprobung lasergeschmolzener Bauteile zu unternehmen. Um dabei die Kosten und das Risiko zu minimieren, ist es vorteilhaft, erst einmal kleinere Komponenten zu erproben, die nachträglich in bestehende Blasköpfe integriert werden können. So wurden in einem ersten Schritt beispielsweise zwei unterschiedliche Düseneinsätze gefertigt, die speziell dafür konzipiert waren, nachträglich in einen Blaskopf eingesetzt zu werden, um die Bindenaht des Pinolenverteilers zu verwischen (Bild 1).

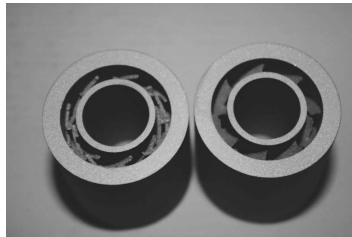


Bild 1: Düseneinsätze mit unterschiedlichen Fließkanaleinbauten, mit deren Hilfe die Bindenaht eines Pinolenkopfs verwischt wurde

Parallel wurde ein neuartiger statischer Schmelzemischer konzipiert, der ebenfalls nachträglich in einen vorhandenen Speicherkopf integriert wurde. Trotz der extrem komplexen Stege im Inneren des Fließkanals, bestand der Mischer nur aus einem Teil mit einem homogenen Gefüge. Vorrangiges Ziel war es, einen möglichst homogenen, bindenahtfreien Vorformling aus der Düse austragen zu können. Bild 2 zeigt den Mischer mit spiralförmigen Mischerstegen, die den Schmelzestrom in zahlreiche kleinvolumige Einzelströme aufteilen.

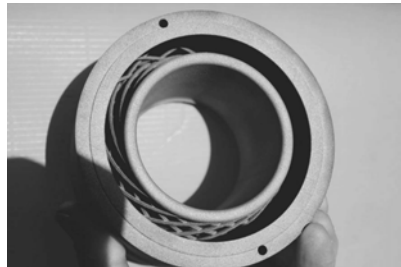


Bild 2: Neuartiger Mischer, der einstückig im Laserschmelzverfahren hergestellt wurde

Gleichzeitig wird die Schmelze aber auch durch das enge Netz aus gegenläufigen, spiralförmig verlaufenden Mischerstegen sowohl in Umfangsrichtung des Fließkanals als auch in radialer Richtung von der Fließkanalwand ins Innere des Kanals und vom Inneren wieder zur Wand umgelenkt. Der Dorn ist bei dem neuartigen lasergeschmolzenen Mischer ausschließlich über die Mischerstege an dem Außengehäuse befestigt. Er hat in den Versuchen bei üblichen Extrusionsbedingungen (z. B. 300 bar, allerdings gemessen vor der Schneckenspitze des Extruders) problemlos standgehalten.

Die Wirksamkeit des Mischers wurde auf einer Blasformanlage über Farbwechselversuche überprüft. Schwarz eingefärbte Formmasse wurde mit naturfarbener herausgespült. Zu einem relativ späten Zeitpunkt zeigte sich vorrangig nur noch auf der Außenoberfläche ein schwarzer Streifen. Er befand sich auf einem Stromfaden, der dem Bindenahtbereich der im Kopf vorhandenen Verteilerpinole zuzuordnen war. Bild 3 zeigt eine Mikroskopaufnahme des Querschnitts der Formteilmwand, die parallel zur Bindenaht ausgeführt wurde. Es ist deutlich zu erkennen, dass die noch auf der Außenoberfläche vorhandene schwarz eingefärbte Formmasse durch den Mischer in mehrere Schichten aufgeteilt wurde, die dann ins Innere der Formteilmwand umgelenkt wurden, sodass keine konkrete Bindenaht mehr vorhanden ist.

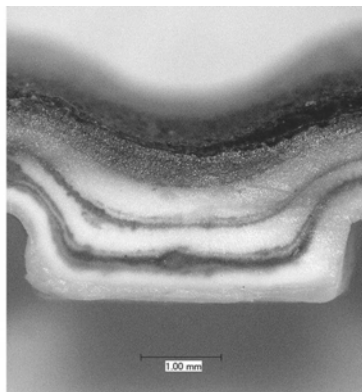


Bild 3: Der Querschnitt durch die Bauteilmwand zeigt keine konkrete Bindenaht mehr, sondern im Inneren der Bauteilmwand einzelne schwarze Schichten, die vom Mischer dorthin umgelenkt wurden (Foto: MPA/IfW TU Darmstadt)

Das erzielte Ergebnis gab Anlass, sich unter nun geänderten Ausgangsbedingungen wieder intensiver mit Stegdornhalterlösungen für Blasköpfe zu beschäftigen. Stegdornhalterköpfe haben immer noch den Vorzug, dass mit ihnen kürzere Verweilzeiten realisiert werden können als mit irgendeiner anderen konkurrierenden technischen Lösung. Gäbe es nicht das Problem, dass die Stege sehr störende Bindenähte erzeugen, dann wären Stegdornhalterköpfe sicherlich nicht nur bei PVC-Werkzeugen sondern auch beim Blasformen viel häufiger erste Wahl. Dies umso mehr, als Stegdornhalterköpfe kostengünstiger herzustellen sind als beispielsweise Pinolen-, Herzkurven- oder Wendelverteilerwerkzeuge.

Der Makel der Bindenahtbildung, und der negativen Beeinflussung des Drucks über dem Umfang des Fließkanals und der dadurch bedingten Unterschiede der Fließgeschwindigkeiten, den konventionell gefertigte Stegdornhalterköpfe besitzen, lässt sich nun mit Hilfe des selektiven Laserschmelzens sogar in einen Vorteil umwandeln. Der Dorn eines Blaskopfes kann nämlich an einer Vielzahl von sehr feinen, speziellen Mischerselementen aufgehängt werden [3]. Dadurch wird die zwischen dem Dorn und der Düse strömende Schmelze nicht mehr nur von wenigen Stegen aufgeteilt und in größeren Fließkanalabschnitten partiell entmischt. Sie wird im Gegenteil intensiv durchmischt, sodass auf Grund der Vielzahl der Einzelströme und der in unterschiedlichsten Raumrichtungen verlaufenden Trennstege oder Trennwänden keine detektierbaren Bindenähte mehr im Formteil vorhanden sind.

Bild 4 zeigt einen solchen Blaskopf in einer Querschnittsdarstellung, bei dem der Dorn an den Mischerstegen befestigt ist. Er unterscheidet sich schon rein äußerlich von konventionellen Köpfen, da er konsequent entsprechend den Möglichkeiten und den Anforderungen, die durch die vorgesehene Fertigung im Laserschmelzverfahren bedingt sind, gestaltet wurde.

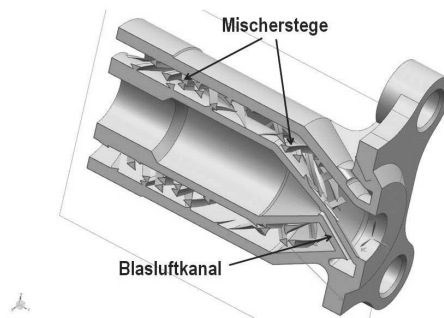


Bild 4: Neuartiger Blaskopf mit Mischerstegen, an denen gleichzeitig der Dorn befestigt ist

Neben den bereits angesprochenen verfahrenstechnischen Vorteilen ist dieser Kopf auch kostengünstiger herzustellen als bisher verwendete Blasköpfe, obwohl er mittels des immer noch relativ teuren Laserschmelzverfahrens hergestellt werden muss. Er kann in sehr kurzer Zeit erschmolzen werden, besitzt durch die viel geringere Masse auch ein geringeres Gewicht und benötigt deshalb im Betrieb natürlich auch weniger Energie. Er lässt sich somit auch viel schneller auf Betriebstemperatur aufheizen als ein konventionell gefertigter Kopf.

Bild 5 zeigt Fotos des neuartigen Mischerstegdornhalters aus zwei unterschiedlichen Ansichten.

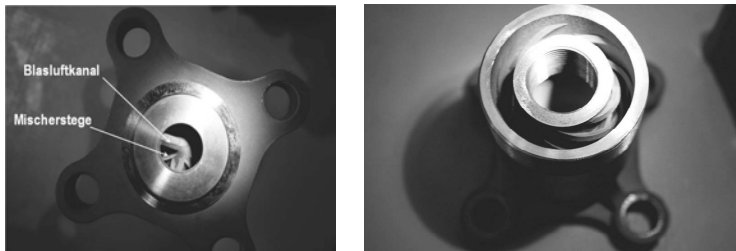


Bild 5: Ein- (links) und Austrittsseite (rechts) des Mischerstegdornhalterkopfes

Natürlich ergeben sich bei einer generativen Fertigung auch neue Möglichkeiten zum Einleiten der Blasluft ins Innere des Dorns. Im gezeigten Beispiel wurde dafür noch ein separater Luftkanal verwendet (siehe Bild 4 und 5). Die negative Beeinflussung der Strömungsverhältnisse sowie die Bindenaht, die sich hinter dem Luftkanal ausbildet, werden durch die sich anschließenden Mischerstege wieder eliminiert. Bild 6 zeigt die Simulationsergebnisse eines Farbwechsels von blau nach rot für den Kopf, bei dem keine Mischerstege im Kanal integriert sind, so dass der Dorn lediglich am Kanal für die Blasluft aufgehängt ist. Deutlich zu erkennen sind das Voreilen der nachgefahrenen roten Schmelze in der Mitte des Kanals und das längere Verweilen der blauen Masse an den Fließkanalwänden sowie die Fließstörung, die durch den Blasluftkanal erzeugt wird.



Bild 6: Die Simulation eines Farbwechsels von blau auf rot zeigt im Querschnitt des Fließkanals das charakteristische parabolische Fließgeschwindigkeitsprofil und die Störung, die durch den Blasluftkanal hervorgerufen wird

Prinzipiell lassen sich aber auch kleine Luftkanäle ins Innere der Mischerstege verlegen, die dann über einen im Außengehäuse befindlichen Sammelkanal mit einer Luftzufuhr verbunden werden können. Die Summe aller Luftkanäle muss dabei so ausgelegt werden, dass ein ausreichend großer Querschnitt entsteht, um das erforderliche Luftvolumen zu erreichen.

Erste praktische Tests des neuartigen Kopfs auf einer Blasformmaschine führten zu einer sehr gleichmäßigen Wanddickenverteilung über dem Umfang des Vorformlings und dementsprechend auch zu einer konstanten Wanddicke über dem Umfang der runden Versuchsflasche. Berechnungen der Schmelzestromverteilung innerhalb des Fließkanals des Kopfes belegen, dass es mit Hilfe der speziellen Mischerstege tatsächlich gelingt, Schmelze von der Fließkanalwand in die Mitte des Fließkanals und umgekehrt zu leiten. Bild 7 zeigt ganz deutlich, dass keine einheitliche Farbfront an den Fließkanalwänden mehr vorhanden ist. Es treten an der Fließkanalwand bereits Farbveränderungen weit vor der massiven roten Farbfront auf.

Es zeigte sich allerdings sowohl bei den praktischen Versuchen als auch bei der Simulation sehr schnell, dass offensichtlich bei der ersten Auslegung des Kopfes zu wenig Mischelemente in den Fließkanal integriert worden sind. Bei den praktischen



Bild 7: Die Simulation eines Farbwechsels von blau nach rot zeigt deutlich, dass mit Hilfe der Mischerstege Schmelze von der Mitte zu den Wänden umgelenkt wird

Farbwechselversuchen ergaben sich noch über einen längeren Zeitraum einzelne farbige Streifen (Bild 8), die auf Strompfade rückschließen lassen, die nur eine unzureichende Durchmischung erfahren und auf denen zumindest bereichsweise eine



Bild 8: Versuchsflasche, die im Verlauf eines Farbwechselversuchs von rot eingefärbtem HDPE zu naturfarbenem in Extrusionsrichtung rote Streifen aufwies

geringe Fließgeschwindigkeit vorhanden ist. Das bestätigen auch die Ergebnisse der Simulationsberechnungen. Sowohl an der Innen- als auch an der Außenwand des Fließkanals befinden sich jeweils 7 Zonen, in denen sich die ursprüngliche Farbe deutlich länger hält, als im Rest des Fließkanals (Bild 9).

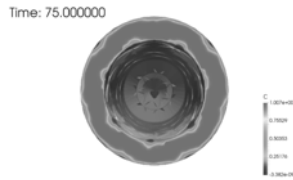


Bild 9: Beim simulierten Farbwechsel von blau nach rot zeigten sich, in Übereinstimmung mit den praktischen Versuchen, jeweils an den Fließkanalwänden 7 Bereiche, in denen die ursprüngliche Farbe länger verbleibt

Auf Grund der Ergebnisse der Simulationsberechnungen erscheint es sehr wahrscheinlich, dass sich speziell an den Orten, an denen die letzten Mischerstege jeweils in die Wände des Fließkanals einmünden Totstellen ergeben, in denen sich die ursprüngliche Farbe länger hält. Um dieses Problem zu eliminieren, wurde der Endbereich der Mischerelemente dahingehend abgeändert, dass die letzten Mischerstege nicht mehr bis zur Wand reichen, sondern dass sie bereits in der Fließkanalmitte enden. Weiterhin wurde die Anzahl der Mischerelemente im Fließkanal erhöht, um eine homogenere Durchmischung der Schmelze zu erreichen. Zum Zeitpunkt der Erstellung beziehungsweise bis zum Abgabetermin dieses Artikels lagen allerdings noch keine Ergebnisse aus Simulationsberechnungen vor. Auch konnte der optimierte Kopf mit der modifizierten Geometrie noch nicht in praktischen Versuchen getestet werden.

Literatur

- 1 N.N.: Teilerfolge beim 3-D-Druck in der Serienproduktion. VDI Verlag Düsseldorf, VDI Nachrichten, Nr. 31/32, Juli 2015, Seite 12-13
- 2 Dlugosch, G.: Schneidwerkzeuge profitieren von additiver Fertigung. VDI Verlag Düsseldorf, VDI Nachrichten, Nr. 31/32, Juli 2015, Seite 14
- 3 Groß, H.; Groß, S.: Mischwerkzeug. Patentanmeldung Nr. DE 10 2015 009 377 A1, Anmeldetag: 18.07.2015

