

KGK

KAUTSCHUK

GUMMI

KUNSTSTOFFE

FORSCHUNG Einfluss der Materialviskosität auf HCR-Schaumprofile

PRAXIS Komplettlösungen für den Elastomerspritzguss

www.kgk-rubberpoint.de

Aktueller Stand zur PFAS-Beschränkung

PFAScon 2025 beleuchtete das
Verfahren und Alternativen, Seite 14



PFAS

WANDEL GESTALTEN

Einladung zur DKG-Jahrestagung



13. - 14. Mai 2025

Juliusspital
Würzburg



Treffpunkt der Kautschukbranche mit
Vorträgen und Mitgliederversammlung

Neben unserem traditionellen Tagungsprogramm mit Vorträgen aus der Fachwelt wird es an beiden Tagen jeweils auch einen „Marktplatz“ mit Vorstellung der Regionalgruppen und unserer Arbeitskreise geben. Dies soll einerseits unseren Status gegenseitig darstellen, und andererseits – am zweiten Tag – daraus die Perspektiven für uns und die Weiterentwicklung der DKG über das Jubiläum 2026 hinaus bieten.

Informationen erhalten Sie hier: www.dkg-rubber.de

MASCHINEN UND ANLAGEN MACHINERY AND EQUIPMENTS

- L. Schmidt, F. Brüning, Paderborn, Germany
Investigation of alternative pinless screw Concepts for Rubber Extrusion 34

ELASTOMERE UND KUNSTSTOFFE ELASTOMERS AND PLASTICS

- Claude Arreyngang Tabe, Ulrich Giese, Hannover, Germany
Investigation of the Polymer Silane Coupling in Model Natural Rubber/
Silica/Silane Systems 41
- Timo Hofmann, Ralf-Urs Giesen, Hans-Peter Heim, Kassel, Deutschland
Einfluss der Materialviskosität auf extrudierte Festsilikonkautschuk-
schaumprofile 50
- A. A. Meshref, A. M. Shawky, Minia, Egypt
Mechanical Properties of Polymethylmethacrylate as a Function of Annealing
Temperatures 55
- Roger Postema, Raffaele Bernardo, Ger Rademakers, Martin van Duin,
Arlanxeo Netherlands B.V., Geleen, The Netherlands
The Effects of Diene Type and Content on the Hydrosilylation Crosslinking
behaviour of EPDM 59
- Masayuki Ito, Tokyo, Japan
Thermal Diffusion of Carbon Molecule into Polytetrafluoroethylene 67

AKTUELLES

- Kolumne – Stimmen der Branche
Neue Entwicklung oder Stand der Technik? 8
- Interview mit Michael Klein
„Es liegt an der Politik zu handeln“ 10
- Aktuelles vom WDK
TPE-Experten on Tour 12

PRAXIS

- Das war die PFAScon 2025
PFAS-Regulierung: Ausdauer nötig 14
- Wie Komplettlösungen die Time-to-Market verkürzen
Hand in Hand schneller ans Ziel 18
- So lässt sich die Elastomerverarbeitung optimieren
Mit KI Fehler vermeiden und Effizienz steigern 22
- So werden Schäume effizient, flexibel und prozesssicher hergestellt
Steuerungssystem für vernetzte Schaumstoffproduktion 24
- 3D-Druck silikonbasierter Materialien
Können künstliche Muskeln echte ersetzen 26
- Dichtungslösungen für die Robotik
Das Geheimnis langlebiger Roboter 28
- Produktionszelle für Mehrkomponenten-Spritzguss
Modulare Fertigung für variantenreiche Bauteile 30
- Kosteneffizientere Kleinserien aus Silikon
Werkzeuge für den Flüssigsilikonspritzguss 33

Titelbild: SERHII – stock.adobe.com



Bild: Redaktion

EDITORIAL

Es ist Ausdauer gefragt

Im PFAS-Beschränkungsverfahren ist noch nichts final entschieden. Die Diskussion und Beschränkung der einzelnen Sektoren ist noch nicht abgeschlossen und der anvisierte Zeitplan derzeit außer Kraft gesetzt. Warten mit der Entwicklung von Alternativwerkstoffen ist jedoch keine Option, denn der Markt fragt PFAS-freie Produkte nach, um auf ein etwaiges Verbot vorbereitet zu sein. Wie dies aktuell vorangetrieben wird, erfahren Sie ab Seite 14.

Ausdauernd müssen die Unternehmen auch bei den so dringend benötigten Entlastungen hinsichtlich Bürokratie und Energiekosten sein. Weshalb WDK-Präsident Michael Klein der Meinung ist, dass es an der Politik liegt zu handeln, erfahren Sie im Interview ab Seite 10.

Ein weiterer Dauerbrenner ist der Fachkräftemangel. Um ungelernten Kräften die Arbeit zu erleichtern oder vollautomatisiert produzieren zu können, bieten die Maschinenbauer diverse Lösungen. Diese lernen Sie ebenfalls in dieser Ausgabe kennen.

Ich wünsche Ihnen zahlreiche Erkenntnisse bei der Lektüre dieser Ausgabe.

Ihre *Simone Fischer*
verantwortliche Redakteurin
KGK/PLASTVERARBEITER
simone.fischer@win-verlag.de

RUBRIKEN

- Focus International 4
- Veranstaltungen
Events 14
- Ausrüstungen und Materialien
Equipments and Materials 25, 49, 66
- Vorschau – Impressum
Preview – Impressum 74

Neue Recyclinganlage in Rotterdam

PYROLYSE Dow hat eine Beteiligung an Xycle erworben, einem auf chemisches Recycling spezialisierten Unternehmen mit Sitz in Rotterdam. Neben den Investoren ING, Invest-NL, Polestar Capital und Vopak unterstützt Dow die Entwicklung von Xycles erster großtechnischer Recyclinganlage. Xycle setzt eine fortschrittliche Pyrolysetechnologie ein, um schwer recycelbare Kunststoffabfälle in Pyrolyseöl umzuwandeln. Im Gegensatz zum mechanischen Recycling, das saubere und sortenreine Kunststoffe benötigt, kann die Pyrolyse auch gemischte und verunreinigte Kunststoffabfälle verwerten. Das Verfahren läuft bei niedrigen Temperaturen ab und erzielt dabei eine hohe Ausbeute an flüssigen Kohlenwasserstoffen, die als Cracker-Feedstock in



Bild: Dow

Dow investiert in Xycle und nutzt Pyrolysetechnologie, um Kunststoffabfälle in neue Rohstoffe zu verwandeln.

der Kunststoffproduktion genutzt werden können. Die Recyclinganlage entsteht im Hafen von Rotterdam und wird nach ihrer geplanten Inbetriebnahme Ende 2026 jährlich 21 kt Kunststoffabfall verarbeiten können. Das produzierte Pyrolyseöl wird Dow als Rohstoff für das Herstellen neuer Kunststoffe nutzen. Die Anlage ist modu-

lar aufgebaut und kann je nach Marktnachfrage skaliert werden. Xycle plant, in Zukunft größere Reaktoren mit einer Kapazität von bis zu 100 kt pro Jahr einzusetzen. Dow verfolgt eine breit angelegte Recyclingstrategie mit dem Ziel, jährlich bis zu 3 Mio. t zirkuläre und erneuerbare Rohstoffe zu verwerten. Das chemische Recycling er-

möglicht das Rückführen von Kunststoffabfällen, die sonst in Müllverbrennungsanlagen oder Deponien enden würden. „Xycles Technologie erlaubt es uns, Kunststoffabfälle in hochwertigen Rohstoff für neue Kunststoffe umzuwandeln“, sagt Kalil. „Die Nachfrage nach recycelten Materialien wächst stetig, insbesondere in Bereichen mit hohen Anforderungen wie Lebensmittelverpackungen, medizinischen Anwendungen und der Automobilindustrie.“ Mit der Investition in Xycle baut Dow sein Engagement für die Kreislaufwirtschaft weiter aus. Die Zusammenarbeit mit spezialisierten Partnern soll sicherstellen, dass Kunststoffabfälle konsequent verwertet und in hochwertige Materialien überführt werden. ■

www.de.dow.com

Georgios Dermentzakis erweitert Geschäftsführung bei Desma

PERSONALIE Die Klöckner Desma Elastomertechnik in Fridingen erweitert ihr Führungsteam. Das weltweit tätige Unternehmen entwickelt Spritzgießmaschinen, Werkzeuge, Automatisierungstechnik und komplette Produktionszellen für das Spritzgießen von Silikon- und Gummiteilen. Georgios Dermentzakis übernahm zum 1. März 2025 als Geschäftsführer

Vertrieb & Service eine Schlüsselrolle im Unternehmen. Er wird die Verantwortung für Vertrieb (Außen- und Innendienst), Exportversand, Kundendienst, Marketing, IT und Datenschutz sowie Qualitätsmanagement übernehmen. Zudem wird er Herrn Dr. Michael Zaun, der seit dem 1. September 2022 Geschäftsführer für die technischen und operativen Bereiche ist, in

den übrigen Geschäftsführungstätigkeiten unterstützen. Dermentzakis letzte Position war Head of Sales EU bei Messer Cutting Systems und umfasste die Führung von Vertriebsteams, der Projektabwicklung sowie der Applikation. Zudem trug er die Verantwortung für Auftragseingangs- und Ergebnisziele in Europa, die strategische Weiterentwicklung des Vertriebsnetzes und die Umsetzung von Marktanalysen. Außerdem sammelte er zuvor Erfahrungen in der Markterschließung in China und war als Projektleiter bei Herrenknecht tätig. Der Diplom-Wirtschaftsingenieur begann seine Laufbahn mit einer Ausbildung zum Industriemechaniker und arbeitete anschließend als Servicetechniker. Georgios Dermentzakis freut sich auf die Zusammenarbeit mit dem Team in Fridingen an der Donau und weiteren Standorten: „Nachhaltiges Wachstum entsteht dort, wo Technologie und Innovation echten Mehrwert schaffen. Ich freue mich darauf, an den Erfolg von Desma anzuknüpfen und gemeinsam die Zukunft zu gestalten.“ ■



Bild: Klöckner Desma

Dr. Michael Zaun (links) begrüßt den weiteren Geschäftsführer Georgios Dermentzakis.

www.desma.biz

Sumitomo (SHI) Demag stellt Management in Nordamerika neu auf

FÜHRUNGSWECHSEL Sumitomo (SHI) Demag Nordamerika ernannt Liam Burns zum Geschäftsführer und John F. Martich III zum COO. Mit dieser neuen Führungsspitze will das Unternehmen Wachstumspotenziale erschließen und die Markenpräsenz stärken. Zum 1. April 2025 hat Liam Burns die Position des Geschäftsführers von Sumitomo (SHI) Demag Nordamerika angetreten. Burns ist seit zwei Jahren im Unternehmen tätig und verantwortete zuvor als Senior Manager den Vertrieb in der nordöstlichen Region. Mit insgesamt 36 Jahren Erfahrung in der Spritzgießindustrie, darunter in technischen und leitenden Positionen, bringt er um-

fassendes Branchenwissen mit. Burns plant, den Mehrwert für Anwender zu steigern, Partnerschaften zu stärken und die Markenpräsenz in Nordamerika weiter auszubauen. Neben Burns erhält auch John F. Martich III eine erweiterte Rolle. Der bisherige Executive Vice President übernimmt mit sofortiger Wirkung die Position des Chief Operating Officer (COO). Seine Aufgaben umfassen die Überwachung der internen Abläufe sowie die Optimierung der Geschäftsprozesse. Dabei arbeitet er eng mit Beth Belay, Corporate Controller & Compliance Officer, zusammen. Group CSO Anatol Sattel erklärt: „Mit diesem Führungsteam ist Sumitomo (SHI)



Bild: Sumitomo (SHI) Demag

Spritzgießmaschinenhersteller Sumitomo (SHI) Demag stellt neues Führungsteam für Nordamerika vor: (v.l.) John F. Martich III, Liam Burns und Beth Belay.

Demag Nordamerika optimal aufgestellt, um seinen Marktanteil zu erweitern und seine internationale Präsenz weiter auszubauen – mit innovativen

Lösungen für die kunststoffverarbeitende Industrie.“ ■

www.sumitomo-shi-demag.eu/de

Dr. Alexander Kronimus wechselt zu Vinylplus Deutschland



Bild: Plastics Europe Deutschland

Wird Geschäftsführer von Vinylplus Deutschland: Dr. Alexander Kronimus.

GESCHÄFTSFÜHRUNG Dr. Alexander Kronimus wird zum 15. Mai 2025 neuer Geschäftsführer von Vinylplus Deutschland e.V., dem Verband der PVC-Wertschöpfungskette zur nachhaltigen Entwicklung. Kronimus wird Thomas Hülsmann nachfolgen, der in den Ruhestand geht. Thomas Hülsmann hat mehr als elf Jahre den Verband Vinylplus Deutschland ge-

leitet. Hülsmann und Kronimus führen von Mai bis August den Verband gemeinsam, um einen guten Übergang sicherzustellen. Kronimus trat 2022 als Leiter für Klimaschutz und Kreislaufwirtschaft bei Plastics Europe Deutschland e.V. ein, wurde 2023 in die Geschäftsleitung des Verbandes berufen und ist derzeit stellvertretender Hauptgeschäftsführer. Die beiden Ver-

bände sind enge Kooperationspartner, die sich mit ihren Betätigungsfeldern unter anderem im Bereich der Kreislaufführung von Kunststoffen und der Transformation der Kunststoffbranche ergänzen. Kronimus sieht seine Tätigkeit beim Verband der Kunststoffherzeuger als Schlüsselerfahrung für die neue Aufgabe. ■

www.vinylplus.de

Wacker Chemie verlängert Vertrag des Finanzvorstands

PERSONALIE Der Aufsichtsrat der Wacker Chemie hat den Vertrag von Finanzvorstand Tobias Ohler um fünf Jahre verlängert. Die Entscheidung fiel in der Sitzung am 27. Februar 2025. Damit bleibt Ohler bis zum 31. Dezember 2030 im Amt. Sein aktueller Vertrag wäre Ende 2025 ausgelaufen. Ohler ist seit Januar 2013 Mitglied des Vorstands der Wacker Chemie. In dieser Funktion verantwortet er zentrale finanzielle und strategische Themen des Unternehmens. Zuvor war er in



Bild: Wacker

Tobias Ohler bleibt bis 2030 Mitglied des Vorstands der Wacker Chemie.

verschiedenen leitenden Positionen innerhalb der Wacker Chemie tätig. Nach seinem Studium der Volkswirtschaftslehre und des Wirtschaftsingenieurwesens in Frankreich, Deutschland und Australien promovierte Ohler an der Universität Oldenburg. Seine berufliche Laufbahn begann er 1997 als Berater bei McKinsey, bevor er 2004 zur Wacker Chemie wechselte. Dort übernahm er ab 2005 das Controlling, 2008 folgte die Leitung des Zentralbereichs Rohstoffein-

kauf. 2010 wurde er in den Vorstand der Siltronic berufen, bevor er 2013 in den Vorstand von Wacker Chemie eintrat. Mit der Entscheidung setzt das Unternehmen auf Stabilität in der Finanzführung. Ohler begleitet Wacker Chemie bereits seit mehr als einem Jahrzehnt und war maßgeblich an der finanziellen Steuerung und strategischen Weiterentwicklung beteiligt. ■

www.wacker.com

Polyolefine: Borealis und Borouge fusionieren

POLYOLEFINE OMV und die Abu Dhabi National Oil Company (Adnoc) haben eine Vereinbarung zur Zusammenführung ihrer Polyolefin-Geschäfte getroffen. Borealis und Borouge werden unter der neuen Borouge Group International gebündelt, an der beide Unternehmen jeweils 46,94% halten. Zudem plant die neue Gesellschaft den Kauf des nordamerikanischen Polyolefin-Herstellers Nova Chemicals für 13,4 Mrd. US-Dollar. Durch diese Fusion entsteht der weltweit viertgrößte Hersteller von Polyolefinen mit einer Produktionskapazität von 12,2 Mio. Jahrestonnen und einer Olefin-Kapazität von 11,4 Mio. Jahrestonnen. Der Hauptsitz der neuen Gesellschaft wird in Wien angesiedelt, während ein regionales Hauptquartier in Abu Dhabi bestehen bleibt. OMV investiert 1,6 Mrd. Euro in die neue Gesellschaft, um die



Bild: Borealis

Borealis-Standort in Schwechat, Österreich.

Eigentumsverhältnisse auszugleichen. Die Übernahme von Nova Chemicals soll die Präsenz der Gruppe in Nordamerika ausbauen und den Zugang zu kostengünstigen Rohstoffen sichern. Die Fusion soll jährliche Kosteneinsparungen von rund 500 Mio. US-Dollar ermöglichen, wovon 75% innerhalb der ersten drei Jahre realisiert werden sollen. Darüber hinaus wird erwartet, dass durch das Borouge-4-Projekt, eine geplante Erweiterung der

Produktionskapazitäten in den Vereinigten Arabischen Emiraten, weiteres Wachstum erzielt wird. Dieses Projekt wird nach Fertigstellung für rund 7,5 Mrd. US-Dollar in die neue Gesellschaft eingebracht und soll ein zusätzliches jährliches EBITDA von rund 900 Mio. US-Dollar generieren. Die Transaktion wird durch Fremdkapital finanziert. Borouge Group International wird eine Mindestdividende von 2,2 Mrd. US-Dollar jährlich ausschütten, wo-

von etwa 1 Mrd. Euro an OMV fließen wird. Zudem plant das Unternehmen eine langfristige Wachstumsstrategie mit einem erweiterten Portfolio an Hochleistungspolyolefinen für verschiedene Industrieanwendungen, darunter Verpackungen, Automobilbau und Bauwesen. OMV und Adnoc behalten gleichberechtigte Entscheidungsrechte in der neuen Gesellschaft. Die Borouge Group International wird eine zweistufige Unternehmensführung haben: Ein Aufsichtsrat mit je fünf Vertretern von OMV und Adnoc sowie potenziellen Arbeitnehmervertretern nach österreichischem Recht. Die Transaktion soll im ersten Quartal 2026 abgeschlossen werden, vorbehaltlich der Zustimmung der Aufsichtsbehörden. ■

www.omv.com

Martin John wird neuer CEO der Krahn Chemie Gruppe

PERSONALIE Zum 1. Mai 2025 tritt Martin John in die Geschäftsleitung der Krahn Chemie Gruppe ein und übernimmt zum 1. Juni die Leitung des Unternehmens. Damit folgt er auf Dr. Rolf Kuroпка, der die Krahn Chemie über 13 Jahre erfolgreich geführt hat. Kuroпка über-

gibt die operative Verantwortung planmäßig und bleibt dem Unternehmen beratend erhalten. John verfügt über mehr als 30 Jahre internationale Erfahrung in der Chemieindustrie. Der Diplom-Betriebswirt (FH) war für Hoechst, Süd Chemie und Clariant in Europa, den USA

und China tätig. In den vergangenen 15 Jahren leitete er globale Geschäftseinheiten bei Clariant, zuletzt im Additivgeschäft für die Lack- und Klebstoffindustrie. Mit der neuen Führung stellt Krahn Chemie die Weichen für weiteres Wachstum. ■

www.krahn.eu/de



Bild: Otto Krahn Group

Martin John wird CEO der Krahn Chemie Gruppe.

Nordmann gibt strategische Partnerschaft mit Wacker bekannt



Bild: Dalle 3/OpenAI

Silikonkautschuke von Wacker werden in Kürze von Nordmann vertrieben.

DISTRIBUTION Ab dem 1. April 2025 verstärkt Nordmann, Hamburg, den Vertrieb und die Vermarktung von Wackers Flüssigsilikonkautschuk (LSR)- und Festsilikonkautschuk (HCR)-Portfolio in ganz Europa. Im Rahmen der Partnerschaft wird Nordmann zur exklusiven Bezugsquelle für eine Auswahl an Silikonelastomeren von Wacker, darunter Hochkonsistenzkautschuk, Flüssigsilikonkautschuk (LSR) und verwand-

te Additive. Diese Produkte, die unter den Marken Elastosil, Powersil und Silpuran vertrieben werden, besitzen eine hohe Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit in verschiedenen Anwendungen. Beide Unternehmen arbeiten eng zusammen, um dem Markt sehr gute Produkte und Dienstleistungen anbieten zu können. ■

www.nordmann.global/de



Ihr Unternehmen in Bestform. **MAPLAN Formenbau.**

Verlässlich. Präzise.



MAPLAN Werkzeugbau. Ihre Quelle für Formen und Kaltkanalblöcke im globalen Maßstab: Dank unserer umfangreichen In-house-Fertigung schafft MAPLAN Unabhängigkeit in der Produktion und damit volle Kontrolle über alle Fertigungsprozesse. Wir garantieren unseren Kunden höchste Qualität, Termintreue und Zuverlässigkeit. Die globale Expansion von MAPLAN bietet Ihnen den Vorteil einer weltweiten Versorgung mit Kaltkanälen und Formen. **Für alle Anwendungen – perfekt zugeschnitten in höchster Qualität.**

STIMMEN DER BRANCHE

Neue Entwicklung oder Stand der Technik?

Mein Name ist Bettina Proksch und ich arbeite seit April 2010 bei Allod Werkstoff, einem Entwicklungspartner für maßgeschneiderte thermoplastische Compounds für die Kunststoffindustrie. Schon während meines Studiums zur Kunststoff- und Elastomertechnik absolvierte ich 2008 ein Praktikum bei der Firma Allod, bei dem es mir vor allem die hochspezialisierten Compounds und Neuentwicklungen angetan hatten.



Bettina Proksch, Werkstoffentwicklung bei Allod Werkstoff in Burg-
bernheim. bettina.proksch@allod.com

Bilder: Allod

Eine der ersten Entwicklungen, bei denen ich mitarbeiten durfte, war die Direkthaftung von thermoplastischen Elastomeren (TPE) an Gummi. Im Labor wurden die unterschiedlichsten Materialkombinationen erprobt. Es gelang uns nicht nur eine sehr gute Haftfestigkeit von TPE an EPDM zu realisieren, auch mit anderen Haftungspartnern wie AEM und CSM konnten gute Haftwerte erzielt werden. Des Weiteren wurden Alterungsprüfungen durchgeführt, unterschiedliche Härtegrade getestet und die Haftwerte bei unterschiedlichen Temperaturen gemessen.

Deshalb profitiert die Automobilindustrie

Meine ersten Untersuchungen zu dem Thema liegen also bereits 17 Jahre zurück. Aber schon damals, als ich mit dieser Entwicklung begonnen habe, war das Thema Haftfestigkeit von TPE an Gummi nicht ganz neu. Bereits seit Ende der 90er Jahre sind erste EPDM-haftungsmodifizierte TPE in Gebrauch. Ganz zu Beginn beschränkte sich der Einsatz wegen der noch unzureichenden Haftfestigkeit jedoch auf statische Anwendungen. So wurden die Endkappen von Karosseriedichtungsprofilen aus EPDM mit thermoplastischen Elastomeren angespritzt. Durch die Verwendung von TPE konnten durch kürzere Zykluszeiten und eine Verringerung der Nacharbeit hohe Kosten für die Automobilindustrie eingespart werden.

Nachdem es vor rund 20 Jahren gelungen ist, die Haftwerte deutlich zu verbessern, können seitdem auch die Eckverbindungen dieser EPDM-Profile aus TPE angespritzt werden. Dabei ist nicht nur die Festigkeit des Haftverbundes entscheidend, vor allem die Haftdehnung muss den hohen Ansprüchen beim Verbau gerecht werden, da es beim Einbau der Profile zu starken Überdehnungen des Materialverbundes kommt.

Weitere Anforderungen an die TPE Compounds, wie ein gutes Dichtungsverhalten und eine hohe Witterungsstabilität wurden nicht außer Acht gelassen und erfüllen die Vorgaben der Automobilbranche.

Ständig in der Weiterentwicklung

Die immer wachsenden Ansprüche der letzten Jahre führten bei der Entwicklung der TPE-Compounds zu weiteren Funktionsintegrationen. Hier sind vor allem die Optimierung der Gleitfähigkeit und der Abriebeigenschaften zu nennen. Dies kann zur Einsparung aufwendiger Lackierprozesse führen.

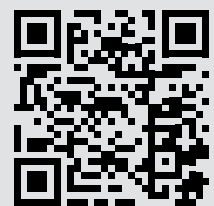
Haftfestigkeit von Thermoplastischen Elastomeren an Gummi – ein Dauerläufer

NEWS LETTER

öffnen

AUGEN

Mit TPE werden Gummiprofile
verbunden oder erhalten ihr
Abschlussstück.



Sichern Sie sich jetzt
Ihren monatlichen kostenfreien
Newsletter!

<https://r-energy.eu/newsletter-2/>

r.energy
ERNEUERBARE ENERGIEN UND DIGITALISIERUNG

**WIN
VERLAG**

Auch wenn seit vielen Jahren die Eckverbindungen und Endkappen von Fensterführungsprofilen beziehungsweise Türdichtungssystemen erfolgreich aus TPE angespritzt werden, so werden die Profile nach wie vor größtenteils aus EPDM hergestellt. Thermoplastische Elastomere kommen bei dynamischen Belastungen immer wieder an ihre Grenzen. So liegen die Entwicklungsschwerpunkte mittlerweile nicht mehr in der Verbesserung des Haftverbundes, sondern mehr in der Optimierung des Rückstellverhaltens des TPE, um eventuell auch Profile zumindest teilweise ersetzen zu können.

Ebenso werden haftungsmodifizierte Compounds mit verbesserter Fließfähigkeit entwickelt, um einen größeren Gestaltungsraum gewährleisten zu können.

Nicht zuletzt spielt mittlerweile auch das Thema Nachhaltigkeit, genau wie in vielen anderen Bereichen eine große Rolle. Wegen des hohen technischen Anspruchs an diese Materialien ist der Einsatz von Rezyklaten jedoch herausfordernd. In jüngster Zeit ist es Allod gelungen ein haftungsmodifiziertes TPE Compound herzustellen, bei dem erhebliche Materialanteile aus Rezyklaten bestehen. Diese neu entwickelten nachhaltigen Compounds haben einen wesentlich niedrigeren CO₂-Fußabdruck wie ihre Vorgänger. Bisherige Tests sehen vielversprechend aus.

Ständig in der Weiterentwicklung

Auch heute noch, rund 20 Jahre nachdem der Compoundeur aus Burgbernheim mit den Entwicklungen zu diesem Thema begonnen hat, hat es nichts an Aktualität verloren. Viele haftungsmodifizierte TPE-Compounds sind inzwischen auf dem Markt und längst Stand der Technik. Dennoch werden die bereits bestehenden Typen ständig weiterentwickelt.

INTERVIEW MIT MICHAEL KLEIN

„Es liegt an der Politik zu handeln“

Interview Michael Klein, Präsident des Wirtschaftsverbandes der deutschen Kautschukindustrie (WDK) sprach exklusiv mit Simone Fischer, verantwortliche Redakteurin der KGK, über die aktuelle Situation und Forderungen der Kautschukbranche sowie über die Pläne in seinem zweiten Amtsjahr.

Herr Klein, bei Ihrer Eröffnungsrede zur Herbsttagung des WDK sagten Sie, dass die Kautschukindustrie resilienter sei als geglaubt. Können Sie Beispiele nennen, weshalb dies so ist?

Michael Klein: In der Vergangenheit hat die deutsche Kautschukindustrie mehrfach bewiesen, dass sie Krisen, auch multipler Art, durchstehen kann. So ist es der Branche beispielsweise gelungen, die Lieferketten, trotz vielfältiger globaler und politischer Herausforderungen, stabil zu halten. Die von den Unternehmen hergestellten Produkte sind in nahezu jedem Lebensbereich zu finden und weltweit technisch führend. Aufgrund dieser Produktvielfalt ist Resilienz ein grundsätzliches Merkmal unserer Branche. Außerdem ist die Kautschukindustrie technologisch innovativ, wodurch sie sich in einem volatilen und disruptiven Marktumfeld behaupten kann. Und, Kautschukprodukte sind unersetzlich und somit auch wir.

Außerdem appellierten Sie an die anwesenden Branchenvertreter, Vertrauen in die Zukunft zu haben. Woher nehmen Sie Ihre Zuversicht?

Klein: In der Natur von Unternehmen und Unternehmensverantwortlichen liegt es, sich Herausforderungen zu stellen. Daher sind Resignation und Gleichgültigkeit untypisch für die deutsche Kautschukindustrie. Wir müssen uns immer wieder aufs Neue auf unsere Stärken besinnen und unsere besonderen Qualifikationen, unsere Innovationskraft, Flexibilität, Kommunikationsstärke, Kooperationsfähigkeit und Lösungsorientierung einsetzen, um den Unterschied zu machen. Die Kautschukbranche steht als Einheit – Konzerne wie mittelständische Firmen – zusammen, das schafft Zuversicht.

Die Kautschukindustrie ist eine Schlüsselindustrie, ohne die nichts steht, geht, fährt und fliegt. Wie kann es die Branche ihrer Meinung nach schaffen hierfür ein Bewusstsein bei den politischen Entscheidern in Berlin und Brüssel sowie in der Bevölkerung zu erzielen?

Klein: Der WDK ist in Berlin mit einem Hauptstadtstudio vertreten. Wir werden von den Ministerien zu Dialogprozessen eingeladen und verfügen über ein sehr gutes Netzwerk mit guten Kontakten zur Bundesregierung und zu Bundestags-



Bild: Redaktion

Michael Klein, Präsident des Wirtschaftsverbandes der Kautschukindustrie (WDK).

abgeordneten sowie zu den Vertretungen der Bundesländer, die im Bundesrat die deutsche Politik mitbestimmen. Ich hatte selbst die Möglichkeit im Bundeswirtschaftsministerium mit der parlamentarischen Staatssekretärin Franziska Brantner über die Lage unserer Branche zu sprechen, sodass wir in Berlin gesehen und gehört werden. In Brüssel ist der WDK akkreditiert und vernetzt und verfolgt auf europäischer Ebene die gleichen Aktivitäten und Ziele wie national.

Auch für die Bewusstseinsbildung in der Bevölkerung gilt gesehen und gehört zu werden. Hier setzen wir auf die Ausweitung der Aktivitäten in den sozialen Medien, um mit Video- und Podcast-Formaten unterschiedliche Zielgruppen zu erreichen. Hierfür bespielen wir neben Youtube, Instagram, Tik Tok und LinkedIn auch Bluesky Social.

In unserem Gespräch zum Beginn Ihrer Amtszeit sagten Sie, dass sich die Lage der Kautschukindustrie nur verbessern kann, wenn sich die Standortbedingungen ändern. Sind Sie zuversichtlich, dass dies nach einem möglichen Regierungswechsel gelingt?

Klein: Hier muss ich leider sagen, dass ein Blick in die Wahlprogramme der Parteien diese Zuversicht nicht gerade fördert. Denn die großen bürgerlichen Parteien scheinen den Ernst der Lage immer noch nicht erkannt zu haben. Mir kommt es so vor, dass es kein Bewusstsein für den energieintensiven Mittelstand in unserem Land gibt, da der Mittelstand nur eine stiefmütterliche Rolle in den vorliegenden Wahlprogrammen spielt. Und das auch bei den Parteien, die sich gerne selbst eine hohe Wirtschaftskompetenz bescheinigen. Deshalb unterstützte der WDK auch den ersten Wirtschaftswarntag des „Aktionsbündnisses Wirtschaftswarntag“ Ende Januar, dessen Ziel es war, auf die aktuelle Wirtschaftslage und die Herausforderungen des Standorts Deutschland aufmerksam zu machen. Mit den Aktionen sollte bewirkt werden, dass die deutsche Wirtschaft in den Fokus der Wähler rückt.

Die notwendigen Entlastungen für die Wirtschaft werden nur vage in den Wahlprogrammen angekündigt, ihre Finanzierung ist jedoch außen vor. Deshalb wird es noch mehr auf die Wirtschaft ankommen, konkrete Schritte anzustoßen, damit sich die Rahmenbedingungen verbessern. Wir haben uns 2024 dazu jedenfalls massiv mit konkreten Vorschlägen zu Wort gemeldet. Jetzt liegt es an der Politik zu handeln.

Könnte hier die Vorwärtsstrategie des WDK, die 2024 initiiert wurde, gar erste Früchte tragen?

Klein: Zu den ersten Früchten gehört die Aufmerksamkeit, die wir als Kautschukbranche erzeugt haben. Weitere Früchte sind, dass sich Forderungen aus unserer Vorwärtsstrategie beispielsweise eins zu eins im Wahlprogramm der FDP wiederfinden. Und auch die CDU hat unser Motto „Lost in Transformation“ übernommen. Wir konzentrieren uns aktuell auf den Industriestandort Deutschland. „Industry Matters“ heißt unser Forderungspapier zur Bundestagswahl, das drei Kernforderungen enthält: Konsequenter Bürokratieabbau („One in, two out“), wettbewerbsfähige Energiepreise und eine Stärkung des Standorts durch eine solide und langfristige angelegte Wirtschaftspolitik, denn die Unternehmen benötigen eine verlässliche Planungsgrundlage. Wir jammern nicht, sondern unterbreiten konkrete Vorschläge, wie ein Politikwechsel gelingen könnte. Unsere wirtschaftspolitischen Forderungen sind verfügbar und glasklar formuliert. Ob und wie die nächste Bundesregierung unsere Forderungen umsetzt, bleibt die entscheidende Frage.

Was erwarten Sie von der Koalition aus Union und SPD?

Klein: Wir erleben gerade gewaltige geopolitische Umwälzungen, auf die wir schlecht vorbereitet sind. Ein starkes Europa braucht ein starkes Deutschland und das kann es nur mit einer starken Industrie geben. Deshalb hoffe ich, dass Schwarz-Rot die Standortprobleme beherzt angeht, also die gesamte Industrie einschließlich des Mittelstands einbindet, sich auf EU-Ebene für eine verschlankte Unternehmens- und einen risikobasierten Ansatz in der Chemikalienregulierung einsetzt, die Besteuerung von Firmengewinnen in Deutschland senkt und die Unternehmensfinanzierung erleichtert. Wichtig ist, dass die zur Verfügung stehenden Sondervermögen strategisch und gezielt investiert und nicht mit der Gießkanne verteilt werden.

Wie blicken Sie auf den Regierungswechsel in den USA hinsichtlich möglicher Zölle?

Klein: Die USA sind für die deutsche Kautschukindustrie ein wichtiger Absatzmarkt und Handelspartner, sodass die Konsequenzen der in Kraft gesetzten Zölle in den nächsten Monaten spürbar sein werden. Diese werden uns als Exportnation und als Branche treffen. Ihr Umfang hängt von der Höhe der Zollsätze, aber auch von Sekundäreffekten ab. Entscheidendere Auswirkungen erwarte ich von dem unmittelbaren Aufkündigen des Green Industrial Deals und vom Ende der staatlich verordneten Elektromobilität in den USA. Hierdurch wird sich meines Erachtens das Drängen der chinesischen Autoindustrie in den EU-Markt weiter verstärken. Für die deutsche Automobilzulieferindustrie kehrt, wie erhofft, durch die Aufkündigung ein Wachstumsmarkt für Verbrenner zurück. Das klingt vielversprechend, jedoch verpufft aufgrund der Euroschwäche zum US-Dollar die relative Verbilligung europäischer Exporte in die USA.

Welche Ziele haben Sie sich als Präsident des WDK für 2025 gesetzt?

Klein: Ich werde mich dafür einsetzen, dass Deutschland ein Standort für die deutsche Kautschukindustrie bleibt. Um dies zu erreichen, werde ich hochrangige Gespräche mit der neuen Bundesregierung führen und dabei die Systemrelevanz unserer Branche erneut betonen. Ich spreche für 220 Unternehmen aus 16 europäischen Staaten, die im WDK-Netzwerk verbunden sind. In der europäischen Interessenvertretung haben wir seit Jahresbeginn neue Freiheiten, die wir für uns, aber auch gemeinsam mit anderen nationalen Kautschukindustrieverbänden in Europa, nutzen müssen. Ich setze mich dafür ein, dass der WDK den Herstellern von Elastomerprodukten und auch ihren spezialisierten Zulieferern eine starke Stimme gegenüber der EU-Kommission und dem EU-Parlament gibt. Deshalb streben wir auch das Vernetzen auf EU-Ebene mit allen für uns interessanten und kooperativen Industrieverbänden an. Der WDK gewinnt seit Jahren Mitglieder hinzu, was mir zeigt, dass wir offenkundig den Unternehmen einen spürbaren Mehrwert bieten. Ich möchte deshalb als Präsident dazu beitragen, dass sich dieser positive Trend fortsetzt. ■

Das Interview führte Simone Fischer, verantwortliche Redakteurin KGK.

TPE-Experten on Tour

Wie das TPE-Forum sein Netzwerk in Italien erweitert Zu einer zweitägigen Netzwerk-Tour traf sich eine Gruppe von Delegierten des TPE-Forums vom 20. bis 21. Februar im Raum Mailand. Die Reise bot vielfältige Gelegenheit zum intensiven Austausch über künftige Projekte des TPE-Forums. Erfahren Sie welche.

Die Plattform TPE-Forum gibt es mittlerweile seit fast zehn Jahren. Wenn auch die wesentlichen Akteure der Gruppe aus Deutschland kommen, stand doch das Thema „internationale Vernetzung“ bereits seit einiger Zeit auf der To-do-Liste. Roberto Molteni, der beim TPE-Compounder Allod Werkstoff, Burgbernheim, für die Anwendungsentwicklung zuständig ist, hatte deshalb für die Mitglieder des TPE-Forums die Netzwerk-Reise durch seine Heimatregion organisiert. Allod ist eines der Gründungsmitglieder des TPE-Forums und Molteni selbst ist daneben unter anderem auch im italienischen Netzwerk TMP (Associazione Italiana Tecnici Materie Plastiche) aktiv.

Molteni kommentierte: „Die Region rund um Mailand ist die Heimat von zahlreichen innovativen Unternehmen, die mit dem Werkstoff TPE arbeiten. Darüber hinaus engagieren sich viele dieser Unternehmen beim Netzwerk TMP. Deshalb lag es auf der Hand, Vertreter des TPE-Forums einmal mit ihnen zusammenzubringen.“

Insgesamt sechs Mitglieder des TPE-Forums – Vertreterinnen und Vertreter von Allod, C4PP, sowie von SKZ und dem WDK, die zu den Trägerorganisationen des TPE-Forums gehören, nahmen an der Reise teil. Auch die Sprecherin des TPE-Forums, Dr. Ines Kühnert vom Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden e.V. war dabei.

Diese Unternehmen wurden besucht

Erste Station war bei der Firma Sipol, die in Mortara PV ihren Hauptsitz hat. Wie Massimo Cattaneo, CEO des Unternehmens, ausführte, ist das Unternehmen spezialisiert auf die Entwicklung und Produktion von Co-Polyester- und Co-Polyamid-Hot Melts, sowie TPC-ETs und biologisch abbaubaren Co-Polyestern.

Autorin

Dr. Stephanie Waschbüsch,
WDK und Mitglied TPE-Forum



Die Gruppe bei ihrem Besuch der Firma Sipol (von links): Umberto Mori, Elena Bolgiaghi, beide Sipol; Roberto Molteni, Allod; Alexander Naeck, SKZ; Dr. Peter Heidemeyer, C4PP; Dr. Ines Kühnert, Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden e.V., Sprecherin TPE-Forum; Kurt Gebert, Allod; Dr. Massimo Cattaneo, Sipol; Dr. Stephanie Waschbüsch, WDK.

Eine Stippvisite in die Welt der Additiven Fertigung bot der Besuch bei Faberlab/Arburg in Origgio. Ilaria Restelli von Faberlab gab der Gruppe einen Einblick in die vielfältigen Möglichkeiten, TPEs in 3D-Druck-Verfahren, wie mit dem Arburg Freeformer, zu innovativen Teilen zu verarbeiten.

Besonderen Eindruck hinterließ der Besuch bei der Firma C.B. – Brescianini. Das Unternehmen mit Sitz in einem unscheinbaren Gebäude im Industriegebiet Pogliano Milanese beeindruckte die Gruppe mit seiner kleinen, aber feinen komplett automatisierten Spritzgießproduktion inklusive eigenem Werkzeugbau. Clelia Petri und Davide Brescianini führen das Unternehmen mit viel Pioniergeist und Kreativität. Die vollautomatisierten Spritzgießlinien und eine ebenfalls vollautomatisierte Materialzuführung ermöglicht „Geisterschichten“, also mannlose Schichten, um Aufträge mit sehr hohen Stückzahlen verlässlich abarbeiten zu können. Verarbeitet wird beispielsweise TPU in Mehrkomponententeilen. Besonders stolz ist man bei C.B. auf die selbstentwickelten wiederverwendbaren Kabelbinder, ein innovatives patentiertes System, das zunächst für die Automobilindustrie entwickelt wurde. Clelia

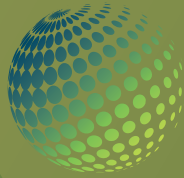
Petri ist auch im Vorstand von TPM engagiert und gab der Gruppe einen Überblick über die Aktivitäten des Netzwerks, das neben einigen Großveranstaltungen eine ganze Reihe an TPE-Weiterbildungsseminaren anbietet.

Die letzte Station der Reise war bei den Extrusionsexperten von Aquatechnik in Magnano. Der Technische Direktor Gabriele Depinto führte die Gruppe durch die Produktion und die ausgezeichnet ausgestatteten Labore. Das Unternehmen stellt unter anderem Rohre für Trinkwasseranwendungen her und setzt in den Dichtungen auch thermoplastische Elastomere ein.

Ines Kühnert, TPE-Forum Sprecherin, fasste die Eindrücke der Netzwerk-Reise zusammen: „Wir konnten auf der Reise tolle Einblicke gewinnen, neue Unternehmen kennenlernen und vielversprechende Kontakte zu Firmen und zum Netzwerk TMP knüpfen. Nicht zuletzt waren wir hocherfreut und dankbar über die Offenheit und Gastfreundschaft unserer italienischen Gastgeber. Wir freuen uns auf den Fortgang der Gespräche.“

KONTAKT

► TPE Forum, Frankfurt
www.tpe-forum.de



BIOPOLYMER

Processing & Moulding

Vor Ort dabei sein: 7. Internationaler Biopolymer Congress!

16.-17. Juni 2025 in Halle (Saale)



Mittendrin statt nur im Stream – der Biopolymer Congress 2025 vor Ort:

Experten treffen, Innovationen entdecken, mit der Community vernetzen!

Ihre Vorteile:

- **Exklusive Award-Verleihung am 16. Juni** – Feiern Sie die Auszeichnung der besten Biopolymer-Innovationen - begleitet von einem kulinarischen Dinner
- **Spannende Exkursion** – Erhalten Sie exklusive Einblicke in die Verarbeitung von Biokunststoffen.
- **Hochkarätiges Vortragsprogramm** – Profitieren Sie von Expertenwissen zu den neuesten Entwicklungen, Trends und Herausforderungen im Bereich Biopolymere.
- **Persönlicher Austausch & Networking** – Diskutieren Sie mit Fachleuten aus Wissenschaft und Industrie.



biopolymer-congress.polykum.de

So einfach geht's:

1. Besuchen Sie unsere Website: biopolymer-congress.polykum.de
2. Registrieren Sie sich für Ihre Teilnahme vor Ort

Jetzt Early-Bird-Ticket sichern & sparen!



Bild: Dalley/OpenAI

Die PFAS-Regulierung ist weiterhin ein stark diskutiertes Thema, auch bei der PFAScon 2025 am Kunststoff-Institut Lüdenscheld.

PFAS-Regulierung: Ausdauer nötig

Das war die PFAScon 2025 Zu der zweiten hybrid durchgeführten PFAScon des Kunststoff-Institut Lüdenscheld hieß Veranstaltungsleiter Thies Falko Pithan rund 50 Personen herzlich willkommen. Vor zwei Jahren wurde die Konsultation der Echa zum möglichen PFAS-Verbot gestartet. Es ist viel passiert in der Zwischenzeit, jedoch hat das Thema nichts an Brisanz verloren. Erfahren Sie mehr.

Thies Falko Pithan wies in seiner Einleitung einerseits auf die Regulierung hin, und andererseits, dass ein Verbot Nährboden für Innovationen sei und neue Chancen biete. „Das Thema muss differenziert betrachtet werden“, so Pithan weiter. Das PFAS-Verbot sei medial aufbereitet worden, so dass es in der breiten Öffentlichkeit

angekommen sei und Lösungen aufgezeigt werden müssten.

Dr. Frauke Auerbeck von der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (Baua) gab dem Auditorium ein Update zum Stand des PFAS-Beschränkungsverfahrens. Weshalb ist eine PFAS-Beschränkung notwendig? Der Grund beruhe auf den Eigenschaften der PFAS: Die Stärke der C-F-Bindung. Daraus resultiert einerseits ihre Beständigkeit in der Anwendung, aber auch deren Persistenz in der Umwelt. Im Jahr 2020 seien 75.000 t fluorhaltige Substanzen in die Umwelt gelangt. „Ohne Regulierung könnten es in den nächsten 30 Jahren 4,5 Mio. t werden“, so Auerbeck. Deshalb wurde der Ent-

schluss gefasst, diese Emissionen in die Umwelt zu minimieren. Der Gruppenansatz wurde gewählt, um zu vermeiden, dass einzelne verbotene PFAS durch andere, nicht regulierte Varianten ersetzt werden könnten.

Dem Anfang 2020 auf den Weg gebrachten Antrag, gingen Literaturrecherchen, Fach- sowie Stakeholdergespräche voraus, von Oktober 2021 bis 2023 das Dossier verfasst und Anfang 2023 eingereicht. Die Einreichungen zur anschließenden Konsultation sorgten für neue Informationen und zusätzliche Einsatzgebiete der Werkstoffe, die jetzt aufgegriffen werden. Mit eines der zentralen Themen seien die Fluorpolymere, diese sind sowohl in der Herstel-

Autorin

Simone Fischer,
verantwortliche Redakteurin KGK



Bild: Redaktion

Thies Falko Pithan begrüßte die Teilnehmer vor Ort und an den Bildschirmen zur zweiten PFAScon.

lung als auch der Entsorgung kritisch, weshalb sie in der Bewertung bleiben, war von Frau Dr. Awerbeck zu hören. Derzeit werden die Einreichungen der Konsultation ausgewertet und an RAC/SEAC zugearbeitet. Am Ende des Verfahrens stehe die RAC/SEAC-Stellungnahme, die die Grundlage für die Entscheidung auf Ebene der EU-Kommission und des Reach-Regelungsausschuss bildet.

PTFE-Ersatz: Nicht immer möglich

Im zweiten Vortrag des Tages stellte Ron Brinitzer, Geschäftsführer von Kunststoffland NRW, die Perspektive der Kunststoffindustrie vor. Er betonte, dass Fluorpolymere in vielen Hochleistungsanwendungen eine unverzichtbare Rolle spielen, etwa in der Medizintechnik, in Chemieanlagen und der Elektronikindustrie. Der gruppenweise Ansatz sei sehr breit und er erachtet diesen als problematisch, da in Chemieanlagen nur mit dieser Polymerklasse die nötigen Temperatur- und Chemikalienbeständigkeiten erzielt werden könnten. Insbesondere Fluorpolymere sollten differenziert betrachtet und aus der Beschränkung ausgenommen werden, da sie aufgrund ihrer chemischen Struktur als sicher gelten. „Niemand würde aufgrund ihres Preises fluorhaltige Werkstoffe einsetzen, wenn er es nicht müsste“, so Brinitzer. Die aktuelle Unsicherheit hinsichtlich der Regulierung führe bereits zu Investitions-

stopps und wirtschaftlichen Schwierigkeiten in betroffenen Industriezweigen sowie steigenden Kosten für Versicherungspolicen. Brinitzer sprach sich für alternative Regulierungsmaßnahmen aus, die beispielsweise die Emissionsbegrenzung bei der Herstellung oder verbesserte Abfallentsorgung beinhalten könnten.

Dimitri Giannakolopoulos von Spectaris widmete sich in seinem Vortrag speziell den Auswirkungen der PFAS-Regulierung auf die Medizintechnik. In diesem Bereich sind PFAS von zentraler Bedeutung, da sie in Implantaten, chirurgischen Instrumenten und medizinischen Geräten eingesetzt werden. Die

besonderen Materialeigenschaften – darunter chemische Beständigkeit, Temperaturstabilität und geringe Reibung – seien entscheidend für die Sicherheit und Langlebigkeit der Produkte. Problematisch sei vor allem der regulatorische Aufwand für die Zulassung neuer Materialien, der in der Medizintechnik äußerst hoch ist. Eine Neuzulassung könne bis zu zehn Jahre dauern, da umfassende Testverfahren und Zertifizierungen erforderlich sind. Hinzu komme, dass einige Versicherer bereits begonnen hätten, den Versicherungsschutz für PFAS-haltige Produkte einzuschränken, was die wirtschaftliche Unsicherheit weiter erhöhe. Giannako-

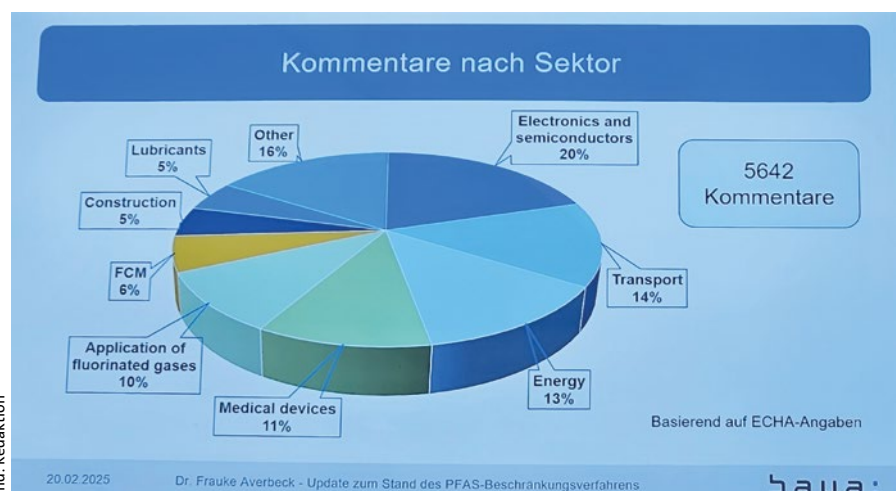


Bild: Redaktion

Frau Dr. Frauke Awerbeck von der Baua zeigte in ihrem Vortrag auf, aus welchen Sektoren die 5.642 zu bearbeitenden Einreichungen stammen.



Bild: Redaktion

An die Vortragsblöcke schlossen sich Paneldiskussionen mit den Referenten an, von denen wie in dieser Runde einer virtuell zugeschaltet war.

lopoulos forderte daher eine differenzierte Betrachtung von Fluoropolymeren und sprach sich für alternative Regulierungsansätze aus.

In der anschließenden Diskussion wurde die Unsicherheit hinsichtlich des Zeitplans der Regulierung thematisiert. Die endgültige Entscheidung könnte sich bis 2028 hinziehen. Besondere Aufmerksamkeit galt der Frage, ob Labor- und Analysegeräte unter die Regulierung fallen würden – hierzu gab es bisher keine klare Aussage. Unterneh-

men berichteten von Investitionsstopps und Schwierigkeiten in den Lieferketten. Zudem wurde diskutiert, ob es nicht sinnvoller sei, spezifische Grenzwerte für Emissionen festzulegen oder bessere Abfallentsorgungsmethoden zu entwickeln, anstatt ein vollständiges Verbot zu verhängen.

Alternativen zu PFAS in Materialien und Anwendungen

Vanessa Nuredin, vom KIT in Karlsruhe, präsentierte die Ergebnisse zur Stu-

welt gelangen.

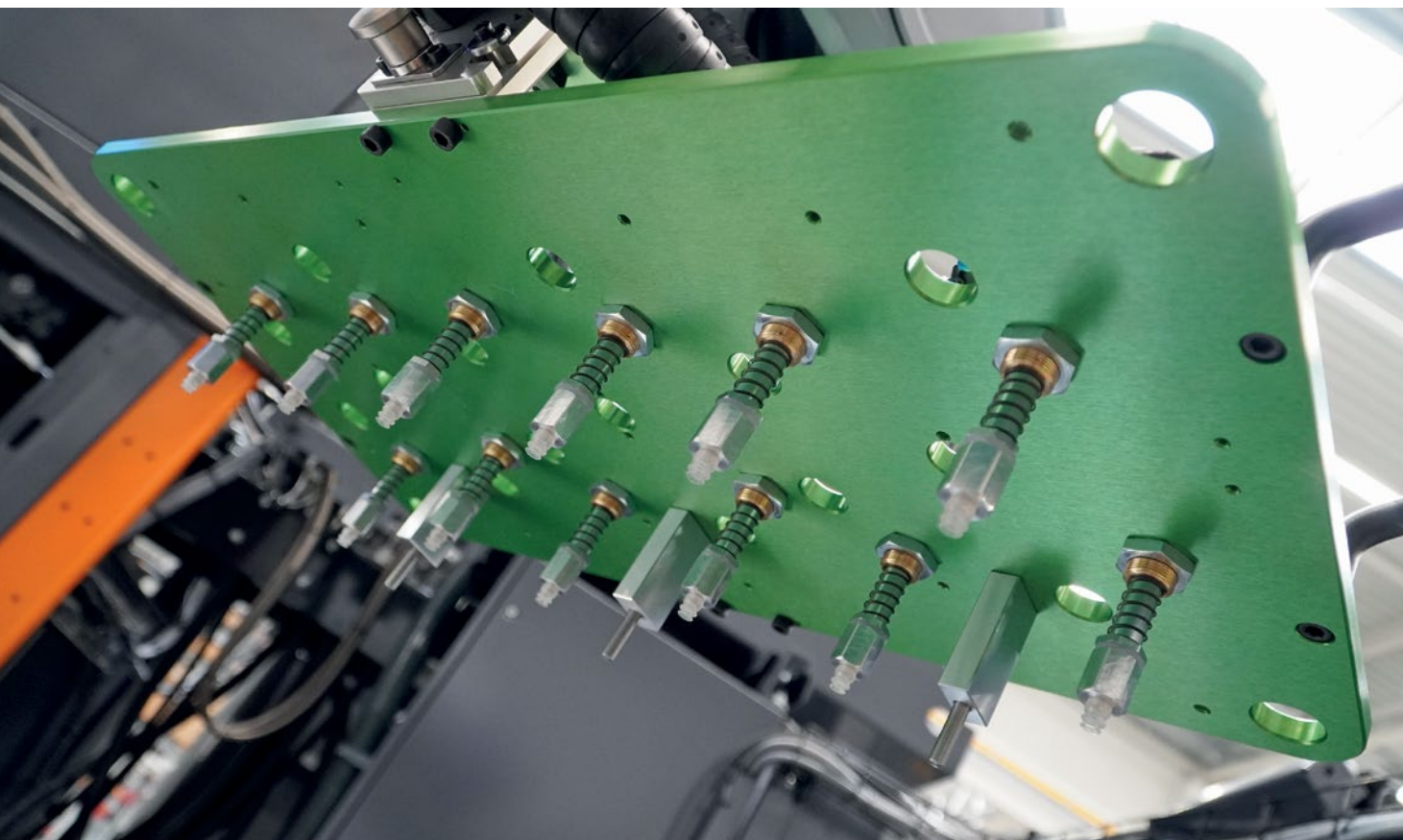
Dr. Uwe Lommatzsch vom IFAM Bremen, betonte, dass es wissenschaftlich schwierig sei, fluorbasierte Eigenschaften mit anderen chemischen Strukturen vollständig zu replizieren. Dennoch gibt es erste Erfolge mit alternativen Beschichtungstechnologien, die hydrophobe und reibungsreduzierende Effekte ohne Fluor erzielen. Diese basieren auf Silikonmodifikationen, Plasmatechnologien und der Nutzung von thermoplastischen Kunststoffen mit speziellen Additiven. Die vorgestellten Technologien ermöglichen es extrem dünne (20 nm bis 10 µm), funktionale Schichten aufzubringen, um die Reibung zu reduzieren und Antihafteigenschaften zu verbessern. Jedoch sei die mechanische Belastbarkeit nicht mit der einer Lackierung vergleichbar. Besonders für Anwendungen in der Medizintechnik, Luft- und Raumfahrt sowie in der Lebensmittelverarbeitung seien solche Lösungen vielversprechend.

Dr. Orth von der Firma Igus erläuterte, wie das Unternehmen gezielt an der Substitution von PTFE in Gleitlagern und anderen beweglichen Komponenten arbeitet. Die Herausforderung bestehe darin, die hervorragenden tribologischen Eigenschaften (Reibungs- und Verschleißverhalten) von PTFE mit alternativen Werkstoffen zu erreichen.



Bild: Redaktion

Im Anschluss an die Vorträge fanden Workshops zu den Themen Werkstoffe, Chancen & Risiken sowie Oberflächen statt.



Bilder: Maplan

Das Handlingsystem entnimmt robotergeführt die Elastomerbauteile aus der Form.

Hand in Hand schneller ans Ziel

Wie Komplettlösungen die Time-to-Market verkürzen Die Automatisierungstechnik hat sich zu einem zentralen Pfeiler der modernen Industrie entwickelt, insbesondere in der Spritzgussmaschinen-Branche. In der Verarbeitung von Gummi und Silikon, einem Bereich mit hohen Anforderungen an Präzision, Effizienz und Flexibilität, werden 360-Grad-Lösungen – also vollständige Gesamtsysteme – zunehmend bedeutender. Erfahren Sie, warum das so ist.

Warum gewinnt Automatisierungstechnik weltweit an Gewicht? Die Antwort liegt in mehreren globalen Trends. Erstens zwingt der immense Kostendruck – ausgelöst durch steigende Rohstoffpreise und internationale Wettbewerbsmärkte – Unternehmen dazu, Prozesse

zu optimieren. Automatisierte Systeme reduzieren manuelle Eingriffe, minimieren Fehlerquoten und steigern die Produktionsgeschwindigkeit, was insbesondere beim Herstellen präziser Gummi- und Silikonformteile einen entscheidenden Vorteil bietet. Zweitens verschärft der Fachkräftemangel die Notwendigkeit, repetitive Aufgaben an Roboter oder Maschinen zu übertragen, sodass qualifiziertes Personal sich auf komplexere Herausforderungen wie Prozessentwicklung oder Qualitätssicherung konzentrieren kann. Drittens verlangt der Markt eine immer höhere Reproduzierbarkeit und Qualität – Standards, die nur durch den Einsatz

moderner Technologien wie integrierter Sensorik, Roboterhandling und vernetzter Steuerungssysteme dauerhaft erfüllt werden können.

Time-to-Market spielt immer öfters eine sehr bedeutende Rolle bei der Vergabe der Projekte. Mit einer Gesamtlösung des Maschinenherstellers können Projektdurchläufe deutlich verkürzt werden. Die Kombination aus Spritzgussmaschinen, Robotern, Peripheriegeräten und anwendungsspezifischen Werkzeugen schafft eine effiziente Produktionskette. Alle Komponenten können durch die zentrale Planung bereits sehr früh im Projektverlauf abgestimmt werden. Das sorgt nicht nur für sehr gut

Autor

Marko Besenlehner,
Interim Head of Marketing

aufeinander abgestimmte Systeme, sondern erleichtert und entlastet die Elastomerverarbeiter. Handling-Roboter übernehmen etwa die Entnahme von Formteilen, Fördersysteme sorgen für die Weiterverarbeitung. Die intelligente und intuitive MAP.Commander CC6 Steuerung bildet eine ganzheitliche Visualisierung und Steuerung der Automatisierungszelle ab. Die hohe Bedienfreundlichkeit ermöglicht einen einfachen Einstieg und reduziert dadurch Einschulungsaufwände.

Intelligente Steuerungen optimieren Echtzeitparameter wie Temperatur oder Druck. Besonders in der Gummi- und Siliconverarbeitung, wo hohe Viskositäten und komplexe Vulkanisierungsprozesse eine Rolle spielen, ist dieser ganzheitliche Ansatz unerlässlich.

Das Unternehmen aus Kottlingbrunn liefert neben Elastomer-Spritzgießmaschinen – wie die Vertikalmaschinen der Ergo+ oder Ergomax+-Serie oder die Horizontalmaschinen der Rapid+-Serie – auch Automatisierungstechnologien aus eigenem Haus. Robotics Lösungen stammen aus dem MAP.Mate Portfolio. Dieses umfasst schnelle Scara Pick & Place Roboter bis hin zu 6-Achs Robotersystemen mit hoher Traglast. Diese Roboterlösungen optimieren die Prozesse wie Be- und Entladung oder die Nachbearbeitung der Gummiformartikel. Ein weiterer Baustein ist der eigene Formenbau, der Werkzeuge und Kaltkanäle liefert. Diese 360-Grad-Strategie bietet den Elastomerverarbeitern Flexibilität, kürzere Lieferzeiten, eine engere Abstimmung zwischen Komponenten und letztlich eine höhere Wirtschaftlichkeit.

Wie die Idee zur Serienproduktion wird

Wie sieht der Einsatz eines solchen Gesamtsystems in der Praxis aus? Die sieben Schritte stammen aus einem realisierten Projekt:

1. Erstkontakt und Beratung: Anfrage einer vollautomatisierten Produktionslinie für ein Gummidichtungssystem. Maplan berät umfassend und erstellt ein grobes Gesamtkonzept inklusive Projektplan und Preisindikation. Dadurch, dass Maschinen, Automatisierung und Werkzeuge aus einer Hand kommen, können die notwendigen Erstinformationen schnell bereitgestellt werden.

2. Produktspezifikation und Musterform: Basierend auf dem herzustellenden Produkt, entwickelt der Maschi-



Blick in die Fertigungszelle.



Über ein Förderband werden die Kautschukblöcke der Spritzgießmaschine bedarfsgerecht zugeführt.

nenbauer eine Musterform, mit der erste Bauteile gefertigt werden. Diese Phase nutzt der hauseigene Formenbau, um das Werkzeug exakt auf Material und Maschine abzustimmen. Dies geschieht durch die gemeinsame Planung von Maschinen und Formtech-

nologie schon sehr früh und trägt somit maßgeblich zum Optimieren des Projektzeitplanes bei.

3. Automatisierungskonzepte: Aus den Ergebnissen der Musterproduktion entstehen Konzepte für die Automatisierung und Entformung, beispielsweise

Eckdaten zum MAP.Commander 6 Cell Control

- Funktion: Zentrale Steuerung der MAP.Autocell via MAP.Commander CC
- Synchronisation: Komplexe Komponenten werden gesteuert und synchronisiert
- Bedienung: Einheitliches Bedienpanel (optional 2), intuitive Maplan-Oberfläche
- Kommunikation: Powerlink (Echtzeit) oder OPC UA
- Features:
 - Diagnose für Maschine/Zelle
 - Optimierungen (Anfahrzyklus, Artikelwechsel)
 - Fernwartung
- Support: Maplan First-Level, auch für 3rd-Party

für die Entnahme und Nachbearbeitung der Teile oder Entgratung und nachgelagerter Qualitätskontrolle, welche ganzheitlich in der MAP.Autocell abgebildet werden.

4. Vorserienteile: Der Kunde erhält Vorserienteile, die direkt in den Freigabeprozess für das Endprodukt einfließen. Diese frühe Rückmeldung ermöglicht Anpassungen, ohne dass große Investitionen in Serienwerkzeuge nötig sind.

5. Parallele Serienentwicklung: Bereits während der Vorserienphase entwickelt der Lösungsanbieter das Serienkonzept weiter. Erkenntnisse aus der Musterform fließen direkt ein, was Abweichungen reduziert und spätere Anpassungen am Werkzeug überflüssig macht. Das spart Zeit und Kosten.

6. Fertigstellung und Abnahme: Das Serienkonzept wird im Haus vollständig aufgebaut und getestet. Der Elastomerverarbeiter kommt zur Abnahme, bei der die finale Serienform in der vollautomatisierten Linie läuft. Nach einer entsprechenden vor Ort Installation der



In die Automationszellen können auch Nachbearbeitungsschritte oder die Qualitätsüberprüfung integriert sein.

Anlage und Anwenderschulung, steht der Serienproduktionsstart unmittelbar bevor.

7. Fortlaufenden Service: Hierfür stehen sämtliche technische Möglichkeiten, wie Remote-Verbindungen zur Maschine oder Zelle zur Verfügung. Damit werden Maschinenstillstände auf das Minimum reduziert.

Dieser Prozess illustriert, wie der ganzheitliche Ansatz funktioniert: Die enge Verzahnung von Werkzeugbau, Maschinenbau und Automatisierungstechnik beschleunigt Entwicklungszyklen und minimiert Risiken.

Deshalb stehen Präzision und Effizienz im Fokus

Ein Schlüsselfaktor dieses Erfolgs ist der eigene Werkzeugbau. Formenbau ist in der Elastomerverarbeitung essenziell, da die Qualität der Werkzeuge die Effizienz und Präzision der Produktion bestimmt. Das Unternehmen hat diesen Bereich mit einer 3.500 m² großen Produktionsfläche im slowakischen Malacky und der Maplan Systems Niederlassung in Süddeutschland ausgebaut. Hier entstehen hochpräzise Spritzgussformen und Kaltkanäle bis 2.500 x 2.000 mm – abgestimmt für Anwendungen in der Automobilindustrie, Energie- oder Öl- und Gasindustrie und weiteren Bereichen.

Ein Linearroboter ermöglicht die sichere Entnahme der acht Bauteile.

Interessantes zum Formenbau

Das 2024 übernommene auf Formen spezialisierte Unternehmen RT-Formtec wurde im Zuge des Integrationsprozesses umstrukturiert, erweitert und neu ausgerichtet. Die aus der RT-Formtec umfirmierte Maplan Systems ist in der Unternehmensgruppe für die Fertigung von präzisen Werkzeugen und Kaltkanälen zuständig.

Die tiefe Eigenfertigung mit Weasystec und Maplan Systems schafft Unabhängigkeit im Formenbau und der Entwicklung von Automatisierungstechnologien und damit Kontrolle über jegliche Fertigungsprozesse. Moderne Simulationstechnologien visualisieren Materialflüsse und optimieren Prozesse ergo die Produkte, Angüsse werden eliminiert, wodurch die Teilequalität steigt. Diese Inhouse-Produktion garantiert nicht nur höchste Präzision, sondern auch Flexibilität und Kosteneffizienz. Das Technikum im Headquarter in Österreich ergänzt dies, indem es Interessenten reale Testmöglichkeiten für Formen, Maschinen und Materialien bietet. ■

KONTAKT

► Maplan, Kottlingbrunn, Österreich
www.maplan.eu

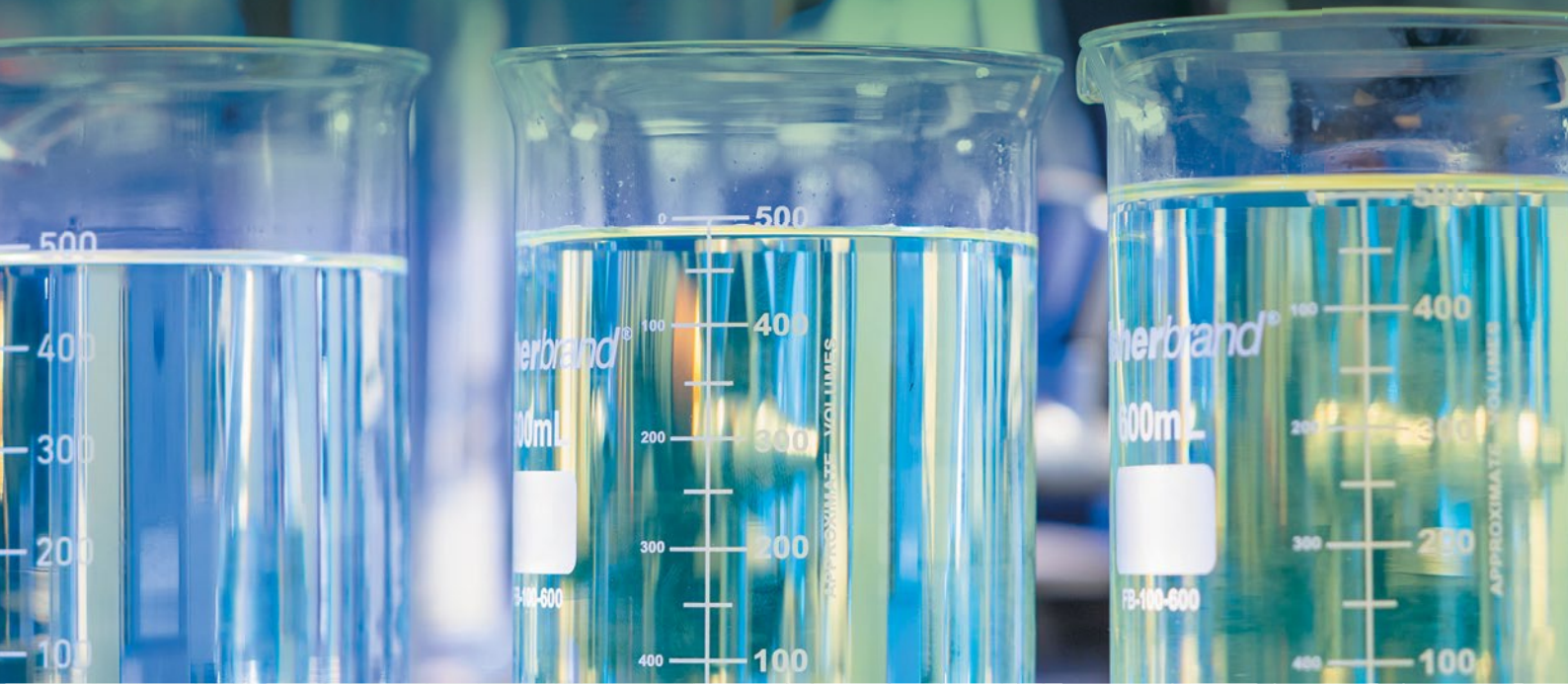
ERGON[®]

HyPrene
| Process Oils

EcoPrene
| Process Oils

NuovoPrene
| Process Oils

OmniPrene
| Process Oils



The Ergon Difference

Industries across the globe trust our team of technical experts to advise them on the specialty oils they need to succeed. We ensure reliability every step of the way. ergonspecialtyoils.com

NORTH & SOUTH AMERICA +1 601 933 3000 / EUROPE, MIDDLE EAST, AFRICA +32 2 351 23 75 / ASIA +65 6329 8040

Mit künstlicher Intelligenz kann die Qualität von Elastomeren im Werkzeug beeinflusst werden.



Mit KI Fehler vermeiden und Effizienz steigern

So lässt sich die Elastomerverarbeitung optimieren Echtzeitüberwachung und KI-Analytik ermöglichen die Qualität zu verbessern und die Produktion zu rationalisieren. Im Artikel erfahren Sie, wie Elastomerverarbeiter mit der Lösung von Sensxpert messbare Ergebnisse erzielen.

Defekte und Ineffizienz sind nach wie vor zwei der größten Herausforderungen in der Elastomerverarbeitung. Von nicht vollständig gefüllten Kavitäten und fehlgeschlagenen elektrischen Isolationstests bis hin zu verlängerten Zykluszeiten, die Ressourcen und Budgets belasten, müssen Verarbeiter konkurrierende Prioritäten berücksichtigen. Herkömmliche Methoden der Prozesskontrolle, die sich auf Annahmen oder Nachkontrollen stützen, können mit den Anforderungen der modernen Produktion oft nicht mithalten.

Technologien unterstützen die Branche, indem sie diese Herausforderungen direkt angehen. Durch die Kombination von Echtzeitüberwachung, künstlicher Intelligenz und dielektrischer Analyse bieten Digital-Mould-Lösungen wie Sensxpert Herstellern die Kontrolle über ihre Prozesse. Die Werkzeuge ermöglichen die doppelte Her-

ausforderung – Defekte und Ineffizienz – anzugehen.

Diese Wissenschaft steckt hinter der Prozesskontrolle

Die Wissenschaft der Elastomerteilefertigung hängt vom Verständnis und der Kontrolle des komplexen Materialverhaltens während der Verarbeitung ab. Das Herzstück der digitalen Prozesssteuerungstechnologie sind die dielektrischen Sensoren im Werkzeug, die ein elektromagnetisches Feld nutzen, um das Materialverhalten in Echtzeit zu überwachen. Sind diese Sensoren aktiv, so senden sie ein elektromagnetisches Feld in das Elastomermaterial und interagieren mit dessen Ionen und Dipolen. Deren Bewegung und Ausrichtung bestimmen die dielektrischen Eigenschaften des Materials, die durch Druck, Temperatur und chemische Veränderungen während der Vulkanisation beeinflusst werden.

Wenn das Material in die Form eingespritzt wird und die Vulkanisation beginnt, messen die Sensoren die Ionenviskosität, einen Parameter, der von der Impedanz des Materials abgeleitet wird und eng mit der Ionenmobilität zusammenhängt. Diese Viskosität spiegelt wider, wie leicht sich Ladungsträ-

ger im Material bewegen, und liefert wichtige Erkenntnisse über das Fließverhalten und den Vernetzungsverlauf des Materials. Aus diesen Daten leitet das System den Vulkanisationsgrad (DOV) ab, der ein Indikator dafür ist, wie weit die chemische Vernetzungsreaktion, die die Elastizität, Haltbarkeit und mechanischen Eigenschaften des Elastomers bestimmt, fortgeschritten ist.

Durch das Sammeln und Analysieren dieser Daten liefert die Digital-Mould-Lösung präzise Erkenntnisse über das Materialverhalten während der gesamten Produktion. In der Anfangsphase erkennen die Sensoren ungleichmäßiges Fließen oder ein unvollständiges Füllen der Kavitäten und verhindern so deren Unterfüllung. Mit fortschreitender Vulkanisation überwachen sie die DOV über die gesamte Materialdicke, um ein gleichmäßiges Vernetzen sicherzustellen und unter- oder übervulkanisierte Abschnitte, die die Leistung beeinträchtigen oder Energie verschwenden könnten, zu vermeiden.

Diese nahtlose Integration von elektromagnetischer Sensorik und fortschrittlicher Analytik ermöglicht der Sensxpert-Technologie eine hohe Präzision beim Überwachen und Steuern

Autorin

Hana Shamaa,
Content Manager Sensxpert

von Elastomer-Verarbeitungsprozessen. Die folgenden Fallstudien veranschaulichen, wie diese Fähigkeiten zu messbaren Verbesserungen bei Qualität und Effizienz führen.

So kann die Zykluszeit reduziert werden

Netzsch Pumps & Systems wollte seinen Produktionsprozess für Gummistatoren optimieren, um den wachsenden Marktanforderungen gerecht zu werden. Um eine ausreichende Vulkanisation dieser Gummiprodukte zu gewährleisten, war deren Zykluszeit konservativ ausgelegt worden.

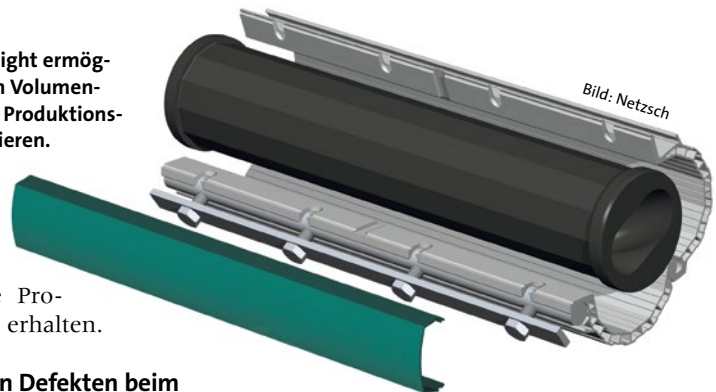
Durch die Zusammenarbeit mit Sensxpert konnte der Gummiverarbeiter eine Echtzeit-Materialüberwachung in die Produktion integrieren. Mittels Datenanalyse passte das System die Zykluszeiten dynamisch an und hielt den gewünschten Vulkanisationsgrad von 90 % aufrecht.

Erzielte Ergebnisse:

- Reduzierung der Zykluszeit: Die durchschnittliche Verkürzung beträgt 23 %, produktabhängig liegt das Einsparungspotential zwischen 14 und 32 %.
- Energieeffizienz: Durch die kürzeren Zyklen werden Energieverbrauch und Betriebskosten verringert.
- Gewinn an Nachhaltigkeit: Die optimierten Prozesse reduzieren den Abfall und verbessern die Gesamteffizienz.

Dieser Fall zeigt, wie Prozesssteuerung Gummiverarbeitern helfen kann, die Produktion zu rationalisieren und

Sensxpert Insight ermöglicht auch von Volumenteilen die Produktionszeit zu optimieren.



gleichzeitig die Produktqualität zu erhalten.

Behandlung von Defekten beim EPDM-Umspritzen

Ein Hersteller, der sich auf das Umspritzen von Hochspannungsleitern mit Ethylen-Propylen-Dien-Monomer (EPDM)-Kautschuk spezialisiert hat, hatte immer wieder mit Defekten zu kämpfen, darunter zu geringe Kavitätsfüllung und ungenügende Durchschlagstests. Diese Probleme beeinträchtigten die Produktqualität und erfordern aufgrund der Komplexität des Prozesses einen erheblichen Aufwand für den Hersteller, um sie zu diagnostizieren und zu beheben. Um diese Probleme zu lösen, integrierte der Hersteller die Sensxpert-Technologie in seinen Gummi-Spritzgießprozess. Das System ermöglicht die Echtzeitüberwachung des Materialverhaltens und deckt Anomalien beim Fließen und Aushärten auf. Qualitätsprobleme werden nun bereits während der Fertigung eliminiert und nicht erst in der Endprüfung der Hochspannungsleiter. Die Analysen ermöglichten außerdem vertauschte Datensätze zu glätten, wodurch verwertbare Erkenntnisse für die Fehlerbehebung vorliegen. Außerdem zeigt die

Echtzeit-Überwachung Potential für Prozessverbesserungen auf, verringert die Abhängigkeit von Trial-and-Error-Methoden und erhöht das Prozessverständnis. Fehler werden nun proaktiv behoben und eine gleichbleibende Produktqualität erzielt.

Der Einfluss fortschrittlicher Prozesskontrolle

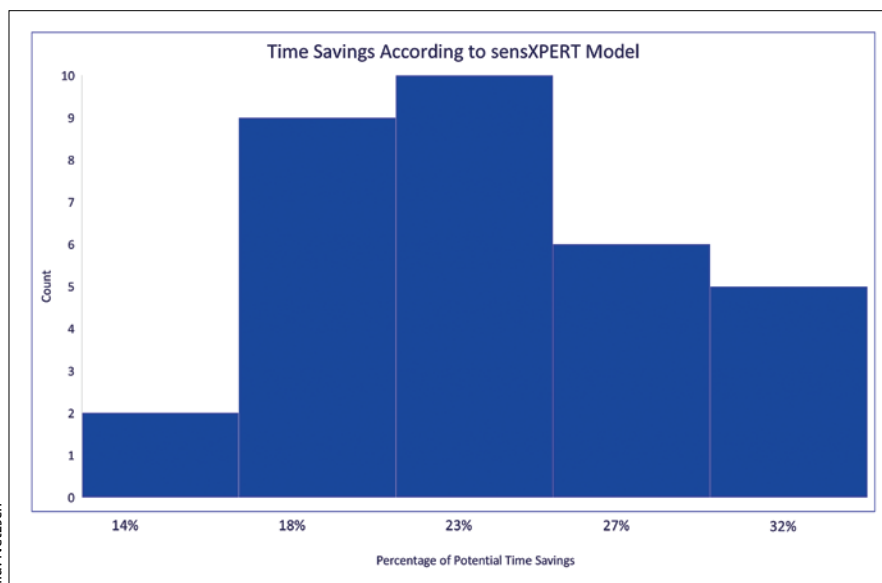
Die obigen Fallstudien zeigen, dass durch die Kombination von Echtzeit-Materialüberwachung, KI-gesteuerter Analytik und dynamischen Prozessanpassungen die Herausforderungen in der Elastomerverarbeitung besser bewältigt werden können. Ermöglicht wird durch das System die Fehlerreduzierung durch Echtzeiteinblicke, indem die Identifizierung und Lösung von Problemen wie unvollständiger Formfüllung und ungleichmäßiger Vernetzung erfolgt. Eine Prozessoptimierung durch dynamische Anpassung der Zyklen auf der Grundlage von Echtzeitdaten reduziert Abfall, rationalisiert die Produktion und verringert den Energieverbrauch.

Der Einsatz dieser Tools verbessert nicht nur die Betriebskennzahlen, sondern verändert den Ansatz in der Fertigung grundlegend und ermöglicht ein Maß an Transparenz und Präzision, das zuvor unerreichbar war. Mit der Fähigkeit, Ergebnisse vorhersagen und dynamisch anpassen zu können, reagieren Hersteller nicht mehr auf Probleme, nachdem sie aufgetreten sind, sondern sorgen proaktiv für verbesserte Qualität und Leistung während des gesamten Prozesses.

Dies ist wichtig in einem Markt, in dem Nachhaltigkeit, Kosteneffizienz und Produktzuverlässigkeit nicht mehr verhandelbar sind. ■

KONTAKT

► Netzsch Process Intelligence, Selbst
www.sensxpert.com



Erzielte Zykluszeiteinsparungen.

Steuerungssystem für vernetzte Schaumstoffproduktion

So werden Schäume effizient, flexibel und prozesssicher hergestellt Die Steuerungsplattform Foamware ist intuitiv bedienbar, funktional und kann nahtlos in bestehende Produktionsumgebungen und IT-Systeme integriert werden. Erfahren Sie mehr über die neue Software von Hennecke.

Die Entwicklung der Foamware basiert auf Henneckes jahrzehntelanger Erfahrung und wurde von Grund auf neu konzipiert. Ziel des Maschinenbauers war es, die technologischen Einschränkungen der bisherigen Systeme wie Purtronic und PDE zu überwinden und eine Plattform zu schaffen, die den steigenden Ansprü-

chen moderner Produktionsprozesse gerecht wird. „Wir haben bei der Entwicklung eng mit unseren Kunden und Anwendern zusammengearbeitet, um deren aktuelle und zukünftige Anforderungen an die Steuerung zu integrieren“, erklärt Eugen Kern, Teamleader Service Sales BU Germany. Die Software ist in zwei Varianten verfügbar:

Foamware Slabstock, die speziell auf Blockschaumanlagen zugeschnitten ist, und Foamware Molded Foam, die für die hochautomatisierte Formschaumproduktion entwickelt wurde. Beide Versionen basieren auf der gleichen Software-Plattform und leistungsfähiger Hardware.

Die Steuerungsplattform Foamware basiert auf einer Hardwarearchitektur, die Performance und Betriebssicherheit gewährleistet. Das freistehende Bedienpult ist mit einem Simatic Quad-Core Industrie-PC und einem 32-Zoll-UHD-Monitor ausgestattet,

wodurch eine ergonomische Benutzerführung sowie eine übersichtliche Darstellung relevanter Prozessparameter ermöglicht wird. Die Erweiterung auf bis zu drei zusätzliche Monitore ist optional verfügbar. Die Grundausstattung umfasst zudem eine unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV), ein Klimagerät, einen Drucker sowie einen Remote-Access-Router zur Online-Diagnose. Ein zentrales Element der Plattform ist das integrierte Third-Party-Interface, welches eine Anbindung an übergeordnete ERP-Systeme ermöglicht und eine Verfügbarkeit aller relevanten Prozessparameter sicherstellt.

Erweiterbare Softwarearchitektur und Prozessüberwachung

Die Plattform bietet standardmäßig Software-Funktionalitäten zur Prozessüberwachung und -steuerung. Neben der Darstellung von Flow-Charts, Process-Charts und dem Calibration Manager umfasst sie Software-Tools zur Analyse von Soll- und Ist-Werten. Eine Funktion ist das „Magic Eye“, welches Dosierabweichungen und Prozessunregelmäßigkeiten in Echtzeit erkennt und visualisiert. Dadurch können Bediener auf Abweichungen reagieren und Produktionsverluste minimieren.

Ein weiteres Element ist die modulare Softwarearchitektur mit einem Plug-In-Konzept. Erweiterungsmodule wie die Hennecke-Prozessanalyse (HPA) zur grafischen Auswertung von Produktionsdaten oder ein Webservice zur mobilen Produktionsüberwachung können integriert werden. Durch die modulare Struktur ist die Foamware-Plattform anpassbar und erweiterbar, sodass zukünftige Anforderungen berücksichtigt werden können.

Die Foamware Slabstock ist für die Blockschaumproduktion konzipiert und unterstützt mit dem Rise Profile Measurement eine Qualitätsüber-



Bilder: Hennecke

Die Steuerungssoftware ist neben der Variante für Blockschaumanlagen nun auch für den Produktbereich Formschaum erhältlich.

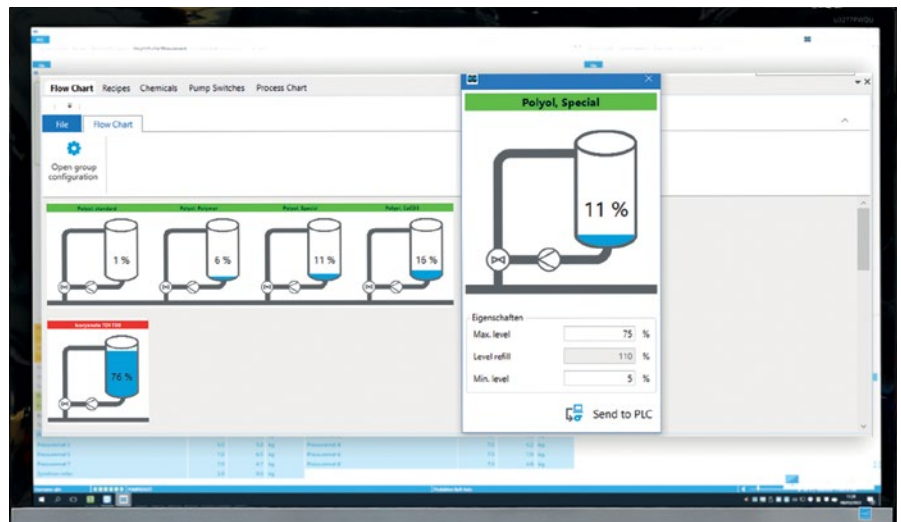
wachung. Hierbei werden bis zu 30 Messpunkte zur Höhenbestimmung entlang des Steigprozesses erfasst, wodurch Abweichungen hinsichtlich Temperatur, Feuchte oder Aktivatoren detektiert werden können.

Zusätzlich ist die Plattform mit dem Auto-Flat-System kompatibel, das eine automatisierte Erzeugung einer planaren Blockschaumoberfläche ermöglicht. Dies trägt zur Prozessstabilität bei und reduziert den Materialverschnitt.

So wird Überproduktion vermieden

Die Foamware Molded Foam ist für Formschaumanwendungen ausgelegt und basiert ebenfalls auf der Plattform. Sie deckt Funktionalitäten der Vorgängerlösung Purtronic ab und bietet darüber hinaus neue Features wie ein Roboter-Modul zum Erstellen und Übertragen von Verfahrenswegen an Industrieroboter. Durch Visualisierungstools unterstützt die Software eine Produktionsüberwachung und Prozessoptimierung. Eine weitere Funktion ist das Part-Tracking, mit dem die Anzahl der produzierten Teile je Form in Echtzeit überwacht wird. Nach Erreichen der Sollstückzahl erfolgt ein Deaktivieren der entsprechenden Form, wodurch eine Überproduktion vermieden und Ressourcen eingespart werden.

Zusätzlich bietet Molded Foam eine Datenkommunikation mit vor- und nachgelagerten Systemen über ein Third-Party-Interface. Dies unterstützt eine digitale Prozessintegration und verbessert die Datenkonsistenz.



Die Füllstände sind übersichtlich dargestellt und können gut abgelesen werden.

Ist ein Retrofit bestehender Anlagen möglich?

Neben Neuanlagen bietet Foamware Retrofit-Lösungen für bestehende Produktionssysteme. Selbst Anlagen mit einem Alter von bis zu 20 Jahren können durch die Modernisierung auf den neuesten Stand der Technik gebracht werden. Dies beinhaltet das Implementieren der aktuellen Visualisierungssoftware sowie die Integration der erforderlichen Hardwarekomponenten.

Die Nachrüstung umfasst je nach Anlagenkonfiguration standardisierte oder anwenderspezifische Anpassungen. Neben der Leistungssteigerung ist ein weiterer Aspekt die Gewährleistung der IT-Sicherheit, insbesondere in Hinblick auf veraltete PDE-Systeme,

die keine Sicherheits-Updates mehr erhalten.

Mit dem Foamware-Complete-Care-Vertrag bietet der Schaumanlagenhersteller ein Servicepaket, das Blockschaumproduzenten Software-Updates, Sicherheitsaktualisierungen und neue Funktionserweiterungen garantiert. Ergänzend dazu umfasst das Angebot Dokumentationsupdates sowie ein Kontingent für technischen Support und Schulungen. Dies stellt sicher, dass Anwender von der Technologie profitieren und ihre Produktionsprozesse optimieren können. ■

KONTAKT

► Hennecke, St. Augustin
www.hennecke.com

Bewährtes weiter optimiert

LSR-FLÜSSIGDOSIERUNG Elmet bringt das neue Top 5100 ein neues LSR-Dosiersystem auf den Markt. Es ersetzt das Top 5000 und eignet sich für 20- und 200-Liter-Fässer. Das kompakte System benötigt weniger Platz, bietet eine optimierte Pumpentechnologie für längere Lebensdauer und erreicht durch höhere Volumenzähler-Auflösung mehr Präzision. Eine überarbeitete Software steigert die Effizienz. Das CE- und UL-zertifizierte System erfüllt die Sicherheitsnorm EN ISO 13849-1 und kann FDA-konform ausgeführt werden. Die phthalat-

freie Bauweise ermöglicht den Einsatz in Lebensmittel- und Healthcare-Anwendungen. Ausgestattet mit der zur Faku-ma 2024 vorgestellten Pumpeneinheit M, erreicht das System 230 bar Förderdruck. Es verarbeitet alle marktüblichen LSR-Materialien mit Viskositäten von 0,001 bis 3.000 Pas, darunter ruß- oder mineralgefüllte sowie abrasive Materialien für die E-Mobilität. Die modular aufgebaute Verarbeitungseinheit mit integrierter Kühlung erleichtert Wartung und Reinigung. Volumenzähler mit 3,9 µl pro Impuls stabilisie-



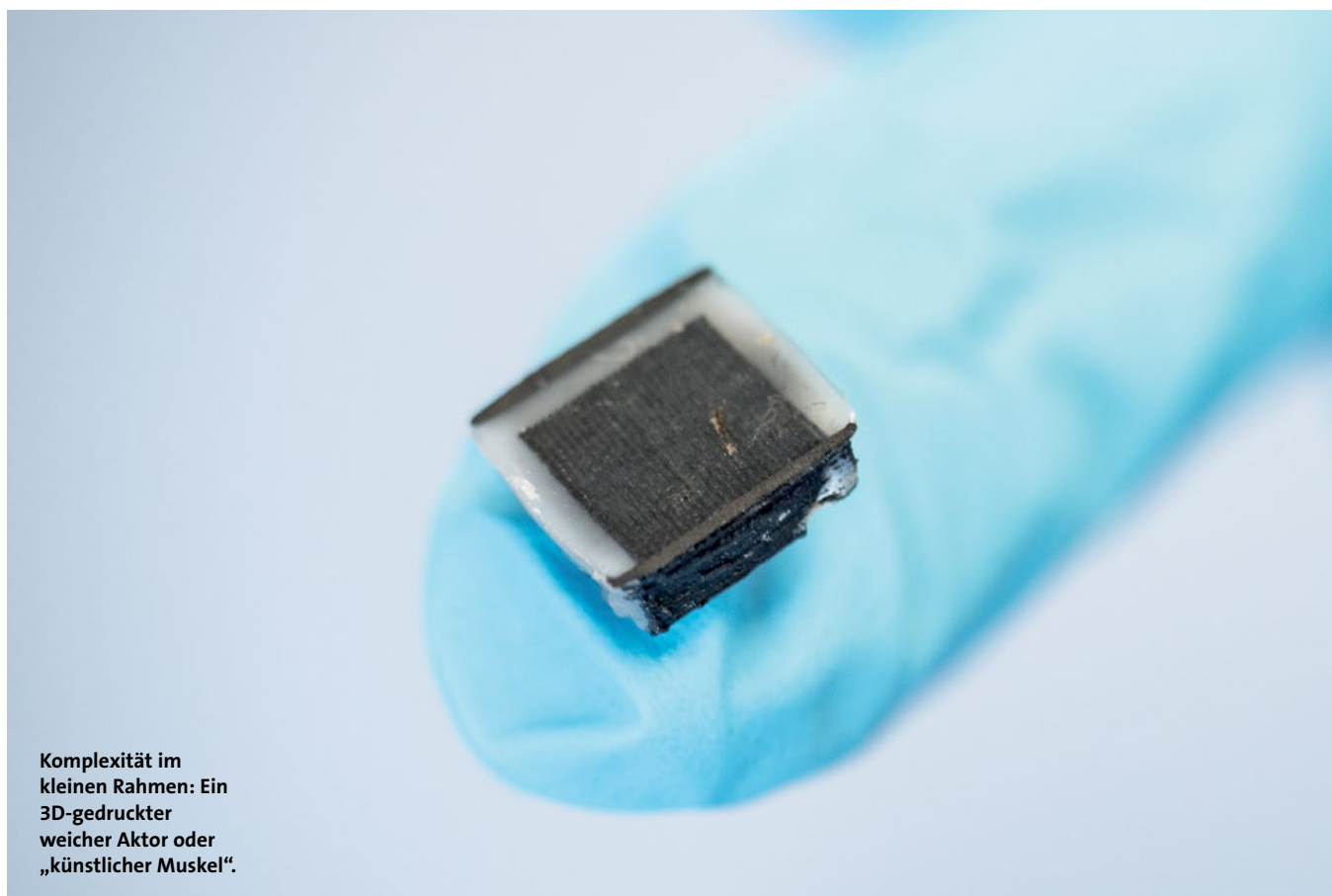
Gegenüber seinem Vorgänger ist das neue Top 5100 nochmals präziser und effizienter.

ren den Mischprozess. Das System nutzt bis zu 99,6% des Materials pro Gebinde. Mit über fünf Litern Förderleistung pro Minute verkürzt es Zyklus-

zeiten bei großen Formteilen und hohen Kavitätanzahlen. Eine geregelte Additivlinie ist standardmäßig vorhanden, bis zu fünf weitere sind nachrüstbar. Additive können aus 1-, 4- oder 20-Liter-Behältern zugeführt werden. Die Additiv-Volumenzähler mit einer Auflösung unter 0,1 µl pro Impuls ermöglichen maximale Präzision, insbesondere bei Kleinstteilen. Dank geringer Instandhaltungskosten und langlebiger Komponenten beträgt die Lebensdauer oft über 20 Jahre. ■

KONTAKT

Elmet, Oftering
www.elmet.com



Bilder: Empa

Komplexität im kleinen Rahmen: Ein 3D-gedruckter weicher Aktor oder „künstlicher Muskel“.

Können künstliche Muskeln echte ersetzen?

3D-Druck silikonbasierter Materialien Forscher der Empa entwickeln künstliche Muskeln aus dem 3D-Drucker. Sie könnten in Robotik, Industrie und Medizin zum Einsatz kommen – etwa, um Maschinen beweglicher zu machen oder Muskeln zu ersetzen. Wie funktioniert die Technologie, und was sind die möglichen Anwendungen?

Künstliche Muskeln könnten nicht nur Roboter in Bewegung versetzen, sondern auch Menschen bei der Arbeit oder beim Gehen unterstützen oder verletzte Muskelgewebe ersetzen. Allerdings ist die Entwicklung künstlicher Muskeln, die mit echten vergleichbar sind, eine große technische Herausforderung. Um ihren biologischen Vorbildern nahe zu kommen, müssen künstliche Muskeln nicht nur leistungsstark, sondern auch elastisch und weich sein. Im Kern sind künstliche Muskeln sogenannte Aktuatoren: Komponenten, die elektrische Impulse

in Bewegung umwandeln. Aktuatoren werden überall dort eingesetzt, wo sich auf Knopfdruck etwas bewegt, sei es zu Hause, im Automotor oder in hochentwickelten Industrieanlagen. Diese harten mechanischen Komponenten haben jedoch bisher wenig mit Muskeln gemeinsam.

Wie werden Widersprüche überwunden?

Ein Team von Forschern aus dem Empa-Labor für Funktionale Polymere arbeitet an Aktuatoren aus weichen Materialien. Erstmals haben sie eine

Methode entwickelt, um solche komplexen Komponenten mittels 3D-Druck herzustellen. Die sogenannten dielektrischen elastischen Aktuatoren (DEA) bestehen aus zwei verschiedenen silikonbasierten Materialien: einem leitfähigen Elektrodenmaterial und einem nicht leitfähigen Dielektrikum. Diese Materialien greifen schichtweise ineinander. „Es ist ein bisschen wie das Ineinanderfalten der Finger“, erklärt Empa-Forscher Patrick Danner. Wird eine elektrische Spannung an die Elektroden angelegt, zieht sich der Aktuator wie ein Muskel zusammen. Wird die Span-

nung abgeschaltet, entspannt er sich wieder in seine ursprüngliche Position.

Der 3D-Druck einer solchen Struktur ist nicht trivial, weiß Danner. Trotz ihrer sehr unterschiedlichen elektrischen Eigenschaften sollten sich die beiden weichen Materialien während des Druckvorgangs sehr ähnlich verhalten. Sie sollten sich nicht vermischen, aber dennoch im fertigen Aktuator zusammenhalten. Die gedruckten „Muskeln“ müssen so weich wie möglich sein, damit ein elektrischer Impuls die erforderliche Verformung verursachen kann. Hinzu kommen die Anforderungen, die alle 3D-druckbaren Materialien erfüllen müssen: Sie müssen unter Druck verflüssigt werden, damit sie aus der Druckerdüse extrudiert werden können. Unmittelbar danach sollten sie jedoch zähflüssig genug sein, um die gedruckte Form beizubehalten. „Diese Eigenschaften stehen oft im direkten Widerspruch“, sagt Danner. „Wenn man eine davon optimiert, ändern sich drei andere... meist zum Schlechteren.“

Welche Anwendungen sind möglich?

In Zusammenarbeit mit einem Forschungsteam der ETH Zürich ist es Danner und Dorina Opris, die die Forschungsgruppe Funktionale Polymere leitet, gelungen, viele dieser widersprüchlichen Eigenschaften in Einklang zu bringen. Zwei spezielle Tinten, entwickelt an der Empa, werden mit einer von ETH-Forschern entwickelten Düse zu funktionierenden weichen Aktuatoren gedruckt. Die Zusammenarbeit ist Teil des Großprojekts Manufhaptics, das zum strategischen Bereich Advanced Manufacturing des ETH-Bereichs ge-



Patrick Danner vom Empa-Labor für Funktionspolymere arbeitet an Aktoren aus weichen Materialien.

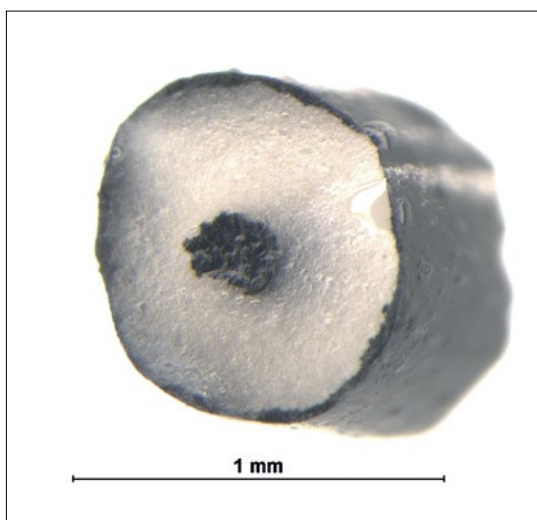
hört. Ziel des Projekts ist es, einen Handschuh zu entwickeln, der virtuelle Welten fühlbar macht. Die künstlichen Muskeln sollen durch Widerstand das Greifen von Objekten simulieren.

Es gibt jedoch weit mehr potenzielle Anwendungen für weiche Aktuatoren. Sie sind leicht, geräuschlos und können dank des neuen 3D-Druckverfahrens nach Bedarf geformt werden. Sie könnten herkömmliche Aktuatoren in Autos, Maschinen und der Robotik ersetzen. Bei weiterer Entwicklung könnten sie auch für medizinische Anwendungen genutzt werden. Dorina Opris und Patrick Danner arbeiten bereits daran. Mit ihrem neuen Verfahren

können nicht nur komplexe Formen, sondern auch lange elastische Fasern gedruckt werden. „Wenn es uns gelingt, sie nur ein wenig dünner zu machen, können wir der Funktionsweise echter Muskelfasern ziemlich nahekommen“, sagt Opris. Die Forscherin glaubt, dass es in Zukunft möglich sein könnte, ein ganzes Herz aus diesen Fasern zu drucken. Bis ein solcher Traum Wirklichkeit wird, gibt es jedoch noch viel zu tun. [db]■

KONTAKT

► Empa, Dübendorf, Schweiz
www.empa.ch



Die Mikroskopie-Aufnahme der gedruckten Muskelfaser zeigt ihre Struktur.

Zwei Spezialtinten werden über eine spezielle Düse zu funktionierenden weichen Aktoren gedruckt.





Humanoide Roboter sind ein bedeutender Wachstumsmarkt. Umso mehr, da die zweibeinigen Maschinen nicht nur in Fabrik- und Lagerhallen arbeiten sollen, sondern auch in der Pflege oder gar unter Tage.

Bild: Arseny Togulev – Unsplash.com

Das Geheimnis langlebiger Roboter

Dichtungslösungen für die Robotik Humanoide Roboter müssen zuverlässig und langlebig sein, egal ob in der Industrie, Pflege oder unter extremen Bedingungen. Entscheidend dafür sind hochwertige Dichtungen, die Reibung reduzieren und Bauteile schützen. Aktiv daran arbeitet Freudenberg Sealing Technologies.

Humanoide Roboter sind auf dem Vormarsch. Sie sollen nicht nur in Fabriken und Lagerhallen eingesetzt werden, sondern auch in der Pflege oder sogar in extremen Umgebungen wie Bergwerken. Ihre Beweglichkeit und Vielseitigkeit ermöglichen neue Anwendungen, stellen aber auch hohe Anforderungen an ihre Konstruktion. Besonders wichtig sind zuverlässige Dichtungen, die entscheidend zur Langlebigkeit und Leistungsfähigkeit dieser Roboter beitragen. Ohne präzise Dichtungssysteme wäre ein dauerhafter, sicherer und effizienter Betrieb dieser hochentwickelten Maschinen kaum denkbar.

Was können humanoide Roboter von Industrierobotern lernen?

Industrieroboter sind aus der modernen Fertigung nicht mehr wegzudenken. Sie arbeiten präzise, ausdauernd und schnell – oft unter extremen Bedingungen. Nun könnten humanoide Roboter

eine noch größere Rolle spielen, indem sie in neue Bereiche vordringen. Erste Pilotprojekte zeigen bereits vielversprechende Ergebnisse: So testete BMW 2024 humanoide Roboter im Karosseriebau, während Amazon sie in Lagerhallen einsetzte. Experten gehen davon aus, dass der globale Markt für humanoide Roboter von 2,43 Mrd. US-Dollar im Jahr 2023 bis 2032 auf über 66 Mrd. US-Dollar anwachsen wird.

Diese Zahlen verdeutlichen das enorme Potenzial dieser Technologie. Humanoide Roboter könnten als multifunktionale Assistenten in zahlreichen Branchen dienen. Neben der Industrie könnten sie zukünftig verstärkt in der Logistik, der Pflege oder sogar im Haushalt zum Einsatz kommen. Durch den Einsatz künstlicher Intelligenz und fort-



Bild: Freudenberg Sealing Technologies

Ein Hersteller von humanoiden Robotern setzt auf IPSR-Dichtungen. Deren Beschaffenheit bildet einen verlässlichen Schutz gegen schädliche Umgebungseinflüsse wie Staub und eindringendes Wasser.

schrittlicher Sensorik sind humanoide Roboter in der Lage, komplexe Aufgaben zu übernehmen und mit Menschen zu interagieren. Dies erfordert jedoch eine robuste Bauweise, die sich an bewährten Prinzipien der Industrierobotik orientiert.

Warum sind Dichtungen essenziell für humanoide Roboter?

Freudenberg Sealing Technologies verfügt über umfassende Erfahrung in der Entwicklung maßgeschneiderter Dichtungslösungen für Industrieroboter. Dieses Know-how kommt nun auch humanoiden Robotern zugute. Dichtungen müssen in diesen Maschinen höchsten Anforderungen genügen – von den großen Gelenken bis hin zu den feinmechanischen Fingergelenken. Diese mechanischen Komponenten sind extremen Belastungen ausgesetzt, sei es durch häufige Bewegung, hohe Drehmomente oder äußere Einflüsse wie Feuchtigkeit und Staub. Dichtungen schützen empfindliche Bauteile vor Verschleiß, verlängern die Lebensdauer der Roboter und tragen dazu bei, deren Wartungsaufwand erheblich zu reduzieren. Hochwertige Dichtungssysteme gewährleisten zudem eine verbesserte Energieeffizienz, da sie Reibungsverluste minimieren und somit weniger Energie verbraucht wird.

Welche Dichtungslösungen gibt es für humanoide Roboter?

- **IPSR-Dichtung:** Besonders widerstandsfähig gegen Staub und Wasser. Diese Dichtung benötigt wenig Platz, gleicht axiale und tangentialer Verschiebungen aus und schützt zuverlässig vor Verschleiß. Sie sorgt für eine zuverlässige Abdichtung der Gelenke und verhindert das Eindringen von Schmutz.
- **PSS-Dichtung:** Eine bewährte Lösung aus der Industrierobotik, die mit minimaler Reibung arbeitet und sowohl nach innen als auch nach außen abdichtet. Sie trägt dazu bei, dass humanoide Roboter effizienter arbeiten und weniger Energieverluste entstehen.
- **PTFE Wafer Seals:** Hochleistungsfähige Dichtungen aus PTFE-Kunststoff, die wasserabweisend sind und in verschiedenen Industrien Verwendung finden. Sie zeichnen sich durch eine besonders lange Haltbarkeit und eine hohe Beständigkeit gegenüber extremen Temperaturen aus.

Diese Dichtungen spielen eine Schlüsselrolle bei der Leistungsfähigkeit humanoider Roboter. Sie sorgen für geringeren Verschleiß, weniger Ener-



Roboter, in diesem Fall Industrieroboter, werden bislang zumeist in industriellen Bereichen wie der Automobilindustrie eingesetzt. Ihre humanoiden Pendanten sind hingegen noch recht neu.

gieverluste und eine längere Lebensdauer der Maschinen.

Wie wichtig ist das Wärmemanagement in humanoiden Robotern?

Ein weiterer wichtiger Aspekt in der Robotik ist das Wärmemanagement, insbesondere im Bereich der Batterie. Miniaturisierte und leistungsfähige Batterien erzeugen mehr Wärme, die zuverlässig abgeführt werden muss. Hier bietet Freudenberg Sealing Technologies innovative Materialien wie Quantix Ultra an – einen Thermoplast, der Temperaturen von bis zu 1.200 °C standhält. Die Herausforderung besteht darin, kompakte und leistungsstarke Batterien zu entwickeln, die den hohen Energiebedarf humanoider Roboter decken können, ohne dabei übermäßig viel Wärme zu erzeugen. Eine effiziente Wärmeableitung ist essenziell, um die Betriebssicherheit und die Langlebigkeit der Roboter zu gewährleisten.

Welche Herausforderungen müssen humanoide Roboter meistern?

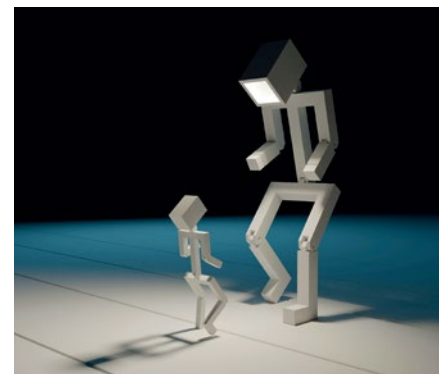
Humanoide Roboter sollen in Zukunft nicht nur in sicheren Industrieumgebungen arbeiten, sondern auch unter widrigen Bedingungen wie Bergwerken oder Outdoor-Einsätzen. Dafür benötigen sie besonders widerstandsfähige Dichtungen, die Feuchtigkeit und Staub zuverlässig abhalten und gleichzeitig stoßdämpfende Eigenschaften bieten. Roboter, die in rauen Umgebungen eingesetzt werden, müssen zusätzlich gegen chemische Einwirkungen, hohe Druckverhältnisse und extreme Temperaturen geschützt sein.

Auch der Einsatz in der Pflegebranche stellt besondere Anforderungen an humanoide Roboter. Sie müssen nicht

nur zuverlässig arbeiten, sondern auch ein hohes Maß an Sicherheit für ihre menschlichen Interaktionspartner gewährleisten. Hier spielt die Materialwahl eine entscheidende Rolle, da Dichtungen antibakterielle Eigenschaften aufweisen und gleichzeitig eine sanfte Haptik bieten sollten.

Wie kann maschinelles Lernen durch neuartige Materialien verbessert werden?

Neben der physischen Konstruktion humanoider Roboter könnte auch die Art, wie sie lernen und sich anpassen, revolutioniert werden. Elektromagnetische Gummimischungen könnten helfen, neuronale Signale oder Muskelbewegungen zu simulieren. Dadurch könnten Roboter ihre Bewegungen schneller und intuitiver erlernen – ein Bereich, in dem Freudenberg Sealing

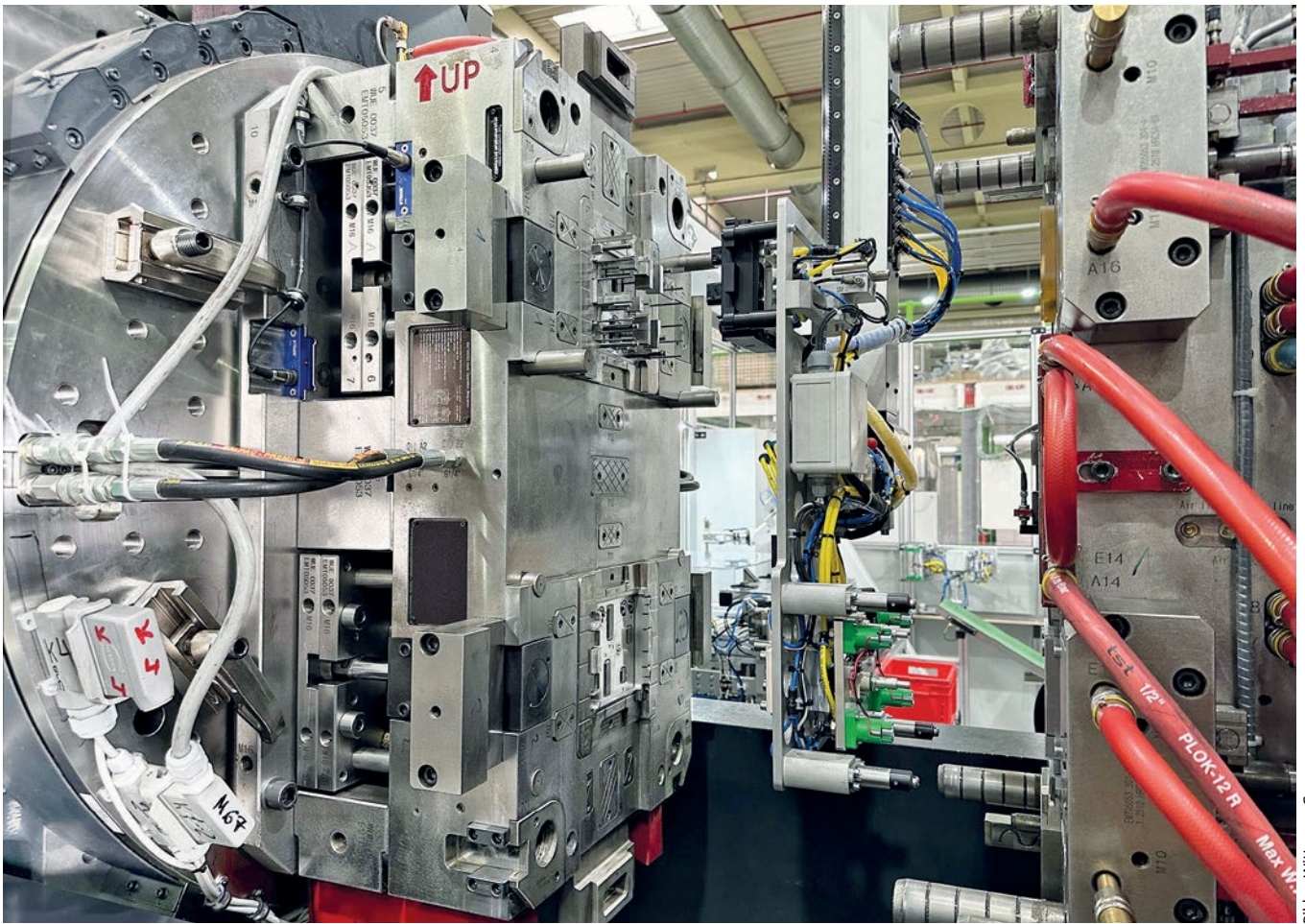


Die Entwicklung humanoider Roboter steckt noch in den Kinderschuhen. Im Zusammenspiel mit Künstlicher Intelligenz und neuen, innovativen Technologien eröffnen sich künftig weitere Potenziale.

Technologies mit seiner Materialkompetenz entscheidende Impulse setzen könnte. In Zukunft könnten smarte Materialien entwickelt werden, die eine noch stärkere Interaktion zwischen Mensch und Maschine ermöglichen. Sensorik-basierte Dichtungssysteme könnten etwa dazu beitragen, dass Roboter auf Umgebungsveränderungen reagieren und ihre Bewegungen entsprechend anpassen. Dies würde humanoide Roboter noch vielseitiger einsetzbar machen. [db] ■

KONTAKT

- Freudenberg Sealing Technologies, Weinheim
www.fst.com



Bilder: Wittmann Group

Blick in die Fertigungszelle: Im Drehtellerwerkzeug werden Polyamid und TPE zeitgleich verarbeitet.

Modulare Fertigung für variantenreiche Bauteile

Produktionszelle für Mehrkomponenten-Spritzguss Reinert Kunststofftechnik, Maier Maschinen- und Werkzeugbau und Wittmann Battenfeld haben eine automatisierte Produktionszelle für Sicherungskästen entwickelt. Sie integriert Einlege-, Spritzgieß-, Montage- und Prüfprozesse in einem flexiblen System. Modulare Komponenten ermöglichen Anpassungen an unterschiedliche Bauteilvarianten.

Um Sicherungskästen für landwirtschaftliche Nutzfahrzeuge wirtschaftlich zu fertigen, setzt Reinert Kunststofftechnik auf eine hochintegrierte Produktionszelle. Die

Autorin

Susanne Zinckgraf,
Head of Strategic Marketing,
Wittmann Group

Automatisierung sorgt für gleichbleibende Qualität, während modulare Konzepte die Anlage flexibel halten. So können verschiedene Varianten des Produkts ohne größere Umrüstzeiten gefertigt werden. „Oft sind wir auch als Entwicklungspartner gefragt, vor allem dann, wenn es knifflig wird“, sagt Jürgen Hahn, Geschäftsführer von Reinert Kunststofftechnik. Dies war auch in diesem Projekt der Fall, da zahlreiche technische Herausforderungen bewäl-

tigt werden mussten. Die Entwicklung der Produktionszelle erfolgte in enger Kooperation mit Maier Maschinen- und Werkzeugbau sowie Wittmann Battenfeld. Während Maier den Produktionsprozess und die Automatisierung konzipierte, lieferte Wittmann Battenfeld die Robotik. Reinert steuerte sein Know-how im Kunststoffspritzguss und in der Prozessintegration bei. Durch die enge Abstimmung konnte eine Lösung entwickelt werden, die den

hohen Anforderungen an Effizienz und Flexibilität gerecht wird.

Wie die Entwicklung und Zusammenarbeit zwischen den Partnern verlief

Die Entwicklung der Produktionszelle erfolgte schrittweise in enger Abstimmung zwischen den drei Unternehmen. Bereits in der Konzeptphase wurden Anforderungen und Herausforderungen gemeinsam definiert. „Herr Klement kam mit einer CAD-Zeichnung des Bauteils zu uns“, erinnert sich Alen Cevra, Geschäftsführer von Maier Maschinen- und Werkzeugbau. Weniger als ein Jahr später war die hochautomatisierte Produktionszelle abgenommen und einsatzbereit. Maier entwickelte die mechanische Konstruktion und das Automatisierungskonzept, Wittmann Battenfeld steuerte die Robotertechnologie bei, während Reinert seine Erfahrungen aus bisherigen Produktionsprojekten einbrachte.

Regelmäßige Abstimmungstreffen und Simulationen halfen dabei, frühzeitig potenzielle Probleme zu erkennen und zu beheben. „Der Schlüssel liegt in der Kommunikation. Wir können offen miteinander reden, auch wenn es mal knirscht, und wir wissen alle, dass wir uns aufeinander verlassen können“, betont Andreas Schramm, Geschäftsführer von Wittmann Battenfeld Deutschland.

Welche Herausforderungen galt es zu meistern?

Neben dem Kostendruck und der großen Variantenvielfalt musste sichergestellt werden, dass die Produktionszelle für weitere Produkte nutzbar ist. Die Anforderungen umfassten eine schnelle Umrüstbarkeit, hohe Präzision und eine durchgängige Qualitätssicherung. Ein besonderer Fokus lag auf der Abstimmung zwischen den einzelnen Prozessschritten, da jede Komponente exakt positioniert und montiert werden muss. „Das ist der Trend“, erklärt Alen Cevra. „Gerade hier in Deutschland haben wir es immer öfter mit einer hohen Produktvarianz und entsprechend kleinen Losgrößen zu tun.“ Das erforderte einfache und schnelle Rüstprozesse sowie eine flexible Anpassung der Produktionszelle an neue Anforderungen.

Die Herausforderung bestand insbesondere in der Kombination verschiedener Produktionsschritte in einer einzigen Anlage. Mechanische Toleranzen, thermische Einflüsse und unterschiedli-



Der Linearroboter W832 Pro von Wittmann ist das Bindeglied zwischen der Spritzgießverarbeitung und den nachfolgenden Arbeitsschritten.



Während der Vorserie werden die Einlegeteile noch manuell zugeführt. Für den Einsatz von Rütteltöpfen, Bunkern und Vereinzelern ist alles vorbereitet.

che Materialeigenschaften mussten berücksichtigt werden, um eine gleichbleibende Qualität zu gewährleisten. Auch der Materialfluss innerhalb der Zelle stellte eine komplexe Aufgabe dar, da verschiedene Varianten ohne manuelle Eingriffe gefertigt werden sollten. Ein weiteres wichtiges Kriterium war die Prozessstabilität bei schwankenden Umgebungstemperaturen. Insbesondere die Kombination aus Kunststoffspritzguss und Metallkomponenten erfordert eine präzise Abstimmung der Materialausdehnung und der Fügeprozesse. Hierbei

war eine enge Abstimmung zwischen den Unternehmen notwendig, um Toleranzen zu minimieren und eine hohe Wiederholgenauigkeit sicherzustellen.

Anpassung an verschiedene Produktvarianten

Da die Produktionszelle für 18 verschiedene Varianten genutzt werden soll, wurde ein System aus modularen Werkzeugeinsätzen entwickelt. Die Maschinensteuerung erkennt automatisch, welches Werkzeug eingesetzt ist, und passt die Prozessparameter entspre-



Der Prozess startet mit der Bereitstellung der Einlege­teile. Hier von einem Roboter übernommen.

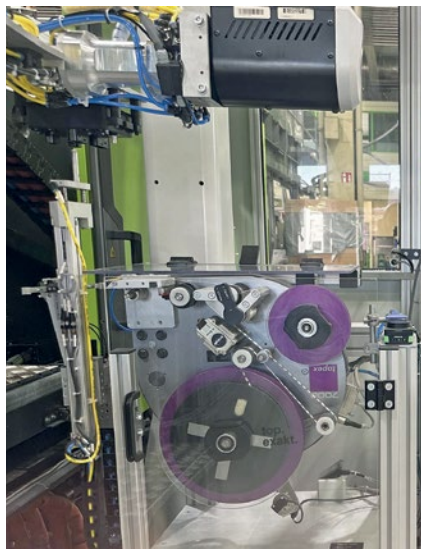
chend an. Dies ermöglicht eine Umstellung der Produktion innerhalb weniger Minuten ohne aufwendige mechanische Umrüstungen. Zusätzlich wurden austauschbare Greiferlösungen für die Roboter entwickelt, um den unterschiedlichen Geometrien der Sicherungskästen gerecht zu werden. Ein zentrales Steuerungssystem koordiniert den Wechsel der Greifer und stellt sicher, dass jede Komponente korrekt gehandhabt wird.

Wie funktioniert der Fertigungsprozess im Detail?

Der Produktionsablauf beginnt mit dem manuellen Einlegen von Metalleinlegern in wechselbare Trays. Diese Trays werden in das Automatisierungssystem eingespeist, das die Einleger an einen Sechssachsroboter übergibt. Dieser positioniert die Buchsen und Schrauben exakt in einem Raster, bevor sie vom Linearroboter aufgenommen und in das Werkzeug der Spritzgießmaschine eingelegt werden. Parallel dazu entnimmt der Roboter fertige Bauteile und führt sie der nächsten Prozessstufe zu. Das Zweikomponenten-Spritzgießverfahren ermöglicht es, die Sicherungskästen in einem einzigen Zyklus zu formen. Zunächst wird die Hartkomponente aus glasfaserverstärktem Polyamid gespritzt, anschließend erfolgt das Umspritzen mit thermoplastischem Elastomer (TPE), das die Dichtung bildet. Dadurch entfällt ein zusätzlicher Montageschritt.

„Ist dieser Bereich vollständig gefüllt, passt auch der Rest der Dichtung“, erklärt Fabio D’Amato, Betriebsleiter von Maier.

Nach der Spritzgießphase erfolgen mehrere Prüfungen. Die Kameraerken-



Mithilfe eines in der Senkrechten beweglichen Stempels werden Silikonmembrane auf der Bauteilunterseite platziert.

nung stellt sicher, dass alle Komponenten korrekt positioniert sind und keine Defekte vorliegen. Zusätzlich werden Dichtheitstests durchgeführt, um die Funktion der TPE-Komponente zu überprüfen. Die gesammelten Daten werden in einem zentralen System gespeichert, um eine lückenlose Rückverfolgbarkeit zu gewährleisten. Um den hohen Qualitätsstandards gerecht zu werden, wurde eine Kombination aus optischer Inspektion, mechanischen Prüfungen und elektrischen Tests implementiert. Dies stellt sicher, dass jedes gefertigte Bauteil die Anforderungen an Haltbarkeit und Funktion erfüllt.

Zukunftsperspektiven der Produktionszelle

Die Produktionszelle ist für eine Jahresproduktion von bis zu 400.000 Baugruppen ausgelegt. In der Vorserie wer-



Der Wittmann Roboter arbeitet mit verschiedenen Greifern, um 18 Produktvarianten flexibel zu unterstützen.

den zunächst 50.000 Sicherungskästen gefertigt. Sobald die Nachfrage steigt, kann die Anlage weiter skaliert werden. „Das Grundkonzept der Produktionszelle hält uns alle Möglichkeiten offen“, betont Christoph Klement. Durch die Option, die manuell bestückten Trays durch Rütteltöpfe, Bunker und Vereinzeler zu ersetzen, kann die Produktionszelle langfristig bis zu acht Stunden autonom arbeiten. Dies sichert eine hohe Effizienz und eine kontinuierliche Optimierung der Fertigungsprozesse.

Die enge Zusammenarbeit zwischen Reinert, Maier und Wittmann Battenfeld wird auch in Zukunft eine Schlüsselrolle spielen. Langfristig ist zudem geplant, die Anlage durch zusätzliche Automatisierungsschritte weiterzuentwickeln, um noch mehr Produktionsprozesse in die Zelle zu integrieren. Dies umfasst beispielsweise erweiterte Prüfmethode, neue Werkstoffkombinationen und eine noch höhere Standardisierung der Fertigungsprozesse. „Wir sehen hier noch viel Potenzial für Weiterentwicklungen“, erklärt Christoph Klement. ■

KONTAKT

- Wittmann Battenfeld, Kottlingbrunn, Österreich
www.wittmann-group.com
- Reinert Kunststofftechnik, Bissingen
www.reinert-group.com
- Maier Maschinen- und Werkzeugbau, Markgröningen
www.maier-maschinenbau.de

Werkzeuge für den Flüssigsilikonspritzguss

Kosteneffizientere Kleinserien aus Silikon Ein Forschungsprojekt des SKZ und der Universität Kassel untersucht, ob Flüssigsilikon (LSR) mit additiv gefertigten, harzbasierten Werkzeugeinsätzen verarbeitet werden kann. Bisher war das nur mit Metallwerkzeugen möglich. Die Forschung könnte neue Möglichkeiten für die Prototypen- und Kleinserienfertigung eröffnen.

Das Kunststoff-Zentrum SKZ und das Unipace (Polymer Application Center) der Universität Kassel haben im Februar 2025 ein Forschungsprojekt mit dem Titel „Addmold für LSR“ gestartet. Ziel ist es, erstmals die Spritzgussverarbeitung von Flüssigsilikon (LSR) mit additiv gefertigten, harzbasierten Werkzeugeinsätzen zu ermöglichen. Additiv gefertigte Werkzeugeinsätze, die mittels 3D-Druck hergestellt werden, haben in der Kunststoffverarbeitung bereits Anwendung gefunden, allerdings bislang nur bei Thermoplasten. Flüssigsilikon hingegen konnte bisher ausschließlich mit klassischen Metallwerkzeugen verarbeitet werden. Die Forschung soll klären, ob auch für LSR-Prototypen, Kleinserien und spezialisierte Anwendungen harzbasierte Werkzeuge eine wirtschaftliche und technisch umsetzbare Alternative bieten.

Warum sind additiv gefertigte Werkzeuge interessant?

Die additive Fertigung ermöglicht die schnelle und kosteneffiziente Produktion von Werkzeugen mit komplexen Geometrien. Insbesondere für Kleinserien und Prototypen könnten sich daraus Vorteile ergeben:

- Verkürzte Produktionszeiten gegenüber konventionellen Metallwerkzeugen
- Geringere Fertigungskosten für kleine Stückzahlen
- Flexiblere Entwicklungsmöglichkeiten durch schnellere Iterationsprozesse

Bisher beschränkt sich der Einsatz solcher Werkzeuge auf die Thermoplastverarbeitung. Flüssigsilikone werden in vielen Branchen, darunter Medizintechnik, Automobilbau und Elektrotechnik, eingesetzt und erfordern spezielle Verarbeitungseigenschaften. Hohe Temperaturen, gleichmäßige Druckverteilung

und präzise Entformung sind entscheidend für die Qualität der Bauteile. Das Forschungsprojekt untersucht, ob additiv gefertigte Werkzeuge diesen Anforderungen standhalten.

Welche Herausforderungen müssen überwunden werden?

Die Wissenschaftler des SKZ und der Universität Kassel analysieren insbesondere folgende Fragestellungen:

- Mechanische Stabilität: Sind harzbasierte Werkzeugeinsätze robust genug, um die hohen Drücke und Temperaturen der LSR-Verarbeitung auszuhalten?
- Thermische Beständigkeit: Wie wirken sich die Prozessbedingungen auf die Standzeit der Werkzeuge aus?
- Oberflächenqualität: Können additiv gefertigte Werkzeuge die für Flüssigsilikon erforderliche Maßhaltigkeit und Detailgenauigkeit gewährleisten?
- Langzeiteinsatz: Sind diese Werkzeuge mehrfach verwendbar, oder sind sie nur für den einmaligen Gebrauch in Prototypen geeignet?

Industrie im Blick: Vorteile für kleine und mittlere Unternehmen

Insbesondere kleine und mittlere Unternehmen (KMU) könnten von den Forschungsergebnissen profitieren. Durch die Möglichkeit, flexible und kosteneffiziente Werkzeuge einzusetzen, ließen sich Entwicklungszeiten verkürzen und Anpassungen schneller umsetzen. Auch Speziallösungen, die bislang aus wirtschaftlichen oder technischen Gründen nicht realisierbar waren, könnten durch den Einsatz additiv gefertigter Werkzeuge leichter umgesetzt werden.

Dr.-Ing. Ralf-Urs Giesen, Geschäftsführer des Unipace der Universität Kassel, erklärt dazu: „Durch diese neue Herangehensweise an die Silikonver-

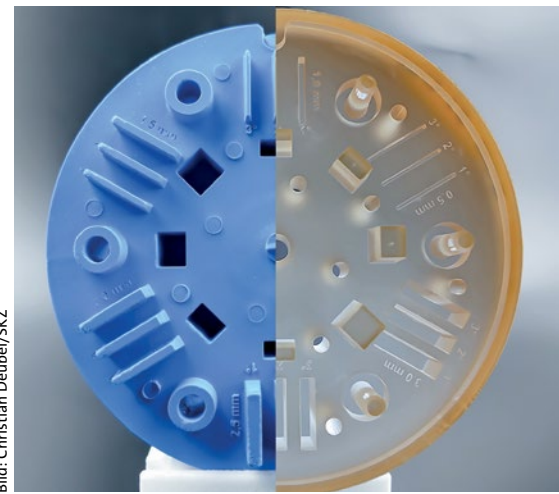


Bild: Christian Deubel/SKZ

Additiv gefertigter Werkzeugeinsatz und das damit gefertigte Bauteil.

beitung könnten Unternehmen, die bereits mit Silikon arbeiten, alternative Werkzeugkonzepte testen. Die Möglichkeit, Werkzeuge schneller und kostengünstiger zu erstellen, könnte neue Forschungsfragen eröffnen.“ Alexander Schulmann, wissenschaftlicher Mitarbeiter für Additive Fertigung am SKZ, ergänzt: „Wir haben bereits Erfahrungen mit additiv gefertigten Werkzeugen für Thermoplaste gesammelt. Nun untersuchen wir, ob sich ähnliche Methoden auf die Flüssigsilikonverarbeitung übertragen lassen.“

Das Forschungsprojekt bietet Unternehmen die Möglichkeit, sich aktiv an der Forschung zu beteiligen. Die Projektpartner laden interessierte Firmen ein, kostenfrei im Projektausschuss mitzuwirken.

[db]■

KONTAKT

► SKZ – Das Kunststoff-Zentrum
www.skz.de

► Unipace – Polymer Application Center, Kassel
www.unipace.de

Processing · Extrusion · Rubber · screw Design

The use of cold-fed pin extruders is state of the art in rubber processing as they deliver remarkable results in homogenization of rubber. In contrast to that the pins are reducing the free channel volume which leads to a decreasing throughput. Therefore, it is interesting for the increase of efficiency to develop screw concepts that are not based on pins but can reach a similar mixing quality. A possible concept might be a screw based on offsets of the flight. The following paper points out the good mixing efficiency of such a screw for natural rubber on a 60 mm extruder. The comparison to a standard screw with full pinning shows that there is a high potential of that concept to reach higher efficiency than common pin extruders with comparable extrudate quality.

Untersuchung alternativer stiftloser Schneckenkonzepte für die Kautschukextrusion

Verarbeitung · Extrusion · Kautschuk · Schnecken-gestaltung

Der Einsatz von kaltgefütterten Stiftextrudern ist in der Kautschukverarbeitung Stand der Technik, da diese bemerkenswerte Ergebnisse bei der Homogenisierung von Kautschuk liefern. Im Gegensatz dazu reduzieren die Stifte das freie Kanalvolumen, was zu einer Verringerung des Durchsatzes führt. Zur Steigerung der Effizienz ist es daher interessant, Schneckenkonzepte zu entwickeln, die nicht auf Stiften basieren, aber eine vergleichbare Mischgüte erreichen können. Ein mögliches Konzept könnte eine Schnecke sein, die auf Stegversätzen basiert. In der folgenden Arbeit wird die gute Mischwirkung einer solchen Schnecke für Naturkautschuk auf einem 60 mm Extruder aufgezeigt. Der Vergleich mit einer Standardschnecke mit voller Bestiftung zeigt, dass dieses Konzept ein hohes Potential hat, vergleichbare Extrudatqualitäten bei gleichzeitiger Effizienzsteigerung zu erzielen.

Figures and Tables: By a kind approval of the authors.

Investigation of alternative pinless screw Concepts for Rubber Extrusion

Introduction

The processing of rubber on extruders has been an important branch of industry for many years. Technical elastomer products, tires and everyday objects such as rubber bands are an integral part of our daily lives. In 2022, 29.6 million tons of natural rubber and synthetic rubber were produced worldwide. This corresponds to the highest production volume to date in the 21st century [1]. Therefore, and due to the elevated energy and raw material expenses [2], cost-effectiveness is getting more and more important for rubber extrusion. There are two concepts of rubber extruders which differ in the temperature of the rubber given in. Warm-fed extruders are fed with material that is already heated up to around 60 to 80 °C in an upstream step, so the extruder just needs to homogenize the material [3]. In contrast cold-fed extruders are fed with material at ambient temperature, so the extruder is heating up and homogenizing the material. Cold-fed extruders are mostly used in today's industry in connection with pins, because this combination leads to remarkable material qualities [3,4,5]. Nevertheless, pins are reducing the maximum throughput compared to screws with conveying thread [5]. Furthermore, the use of pins results in an increased complexity of and higher expenses for production, maintenance and conversion when compared to pinless extruders. Because of that and based on encouraging findings at Kunststofftechnik Paderborn regarding screws with radial and axial flight offsets those alternative screw concepts need further exploration [6,7].

Materials

An NR mixture based on a mixture from tire production was used for the investigations. The mixture was developed especially for those investigations, because it was necessary to use material in different colors for dead-stops to deduce to the mixing quality. The material was therefore used in yellow and blue with otherwise identical formulation. Because of the necessary absence of carbon black

the development was supported by different partners from industry to ensure that the mixture is representative for their applications anyway.

The NR mixture, shown in Table 1, consists of 90 phr NR and 10 phr SBR. The fillers used in this mixture are silica with a proportion of 68.75 phr and chalk with 15 phr. Small quantities of plasticizers, colorants and other minor chemicals are used, which also contain the sulphur-based cross-linking system, so that the mixture comprises a total of 206.45 phr. The mixture was chosen based on a mixture from tire production, but does not contain carbon black.

This composition results in a high mooney-viscosity ML1+4 (100 °C) of 93 MU why it can be considered as difficult regarding the mixing during processing.

Equipment and Screws

A 60 mm rubber extruder QSM 60k-12 D, Troester, Hanover (Germany) is used for the experimental investigations. The extruder can be fitted with modular barrel elements, allowing its length to be varied. Each barrel element has a length of 4.5 D and has channels for water temperature control as well as four pin levels for 6 pins each. The feed section and the screws used also have water temperature control. The configuration used in this case is shown in the schematic illustration in Figure 1 and consists of three

Authors:

L. Schmidt, F. Brüning,
Paderborn, Germany

Corresponding Author:

L. Schmidt
Paderborn University
Warburger Straße 100
33098 Paderborn, Germany

E-Mail:

leon.schmidt@ktp.uni-paderborn.de

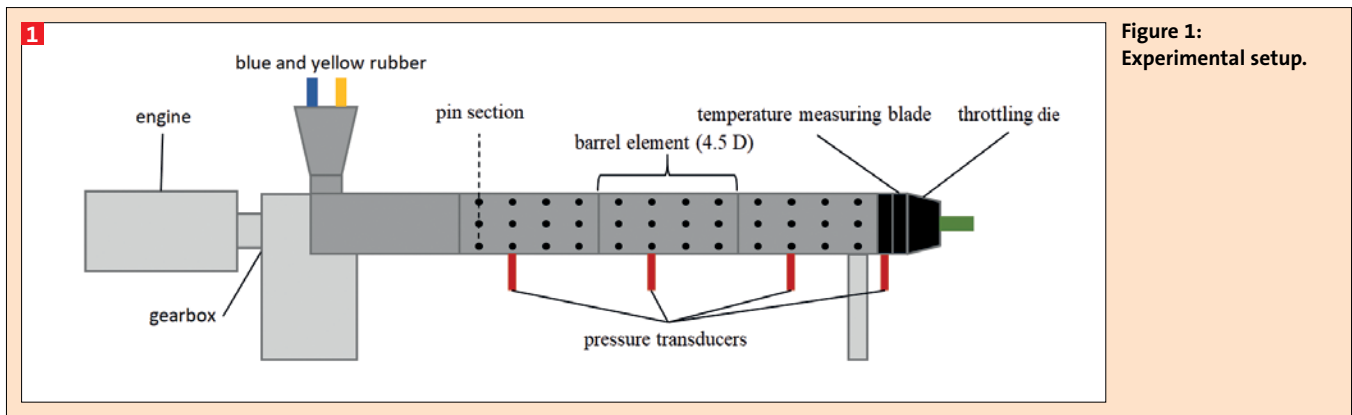


Figure 1:
Experimental setup.

barrel elements, resulting in a total length of 18.3 D. The pressure can be recorded at a pin position of the second pin level in each of the mounted barrel elements. This can also be recorded directly at the screw tip via an additional measuring ring. A temperature measuring blade is also mounted on the screw tip, on which the temperature can be recorded at seven positions across the channel cross-section. A square shaped throttling die with an opening of 86x86 mm is used.

For the evaluation of the two-colored dead-stops the software ImageJ was used. ImageJ is an Open-Source Software which can be fitted to several use cases, which is why the software is frequently used for research purposes [8]. For the color analysis the native software can be used without changes as it allows to analyze pictures for several color spectrums.

As the rubber gets vulcanized inside the barrel it becomes possible to cut small slices out of the screw channel. Those slices can be scanned and analyzed via ImageJ to compare the two screws and different operating points. The analysis is possible because of the blue and yellow material. The area of the remaining blue and yellow material can be investigated by the use of the color thresholding function in ImageJ. From those areas the mixed part of the surface can be calculated by Equation 1:

$$A_m = A_t - (A_y + A_b) \quad \text{Equation 1}$$

A_m = mixed Area
 A_t = total Area
 A_y = yellow Area
 A_b = blue Area

This was already used in [6] and [9] and shows itself to be a good method for quantifying the material homogeneity.

In contrast to [6] and [9] the color thresholding values shown in table 2 have been changed as those are empirical values that need to be set for each mixture separately. For red, green and blue it can be decided by a check box, whether a defined range of that color should or should not pass, which is indicated in the table. As a result, the blue and yellow surface can be separated as shown in figure 2.

Two different screws have been used for the experimental investigations to compare the conventional concept with the alternative concept based on offsets. The screw A representing the pin extruder is based on a 60 mm diameter and a length of 18.3 D. The length is chosen because of typical lengths for cold-fed extruders [4]. It is a two-channel single-section screw with a pitch of 80 mm and a channel depth of 12 mm. It is characterized by 12

interruptions in each flight with a length of 10 mm. Each of these interruptions corresponds to one of 12 planes in the barrel which are able to take 6 pins each. The 72 pins used in the investigations have a diameter of 6 mm and a length of 10 mm. The screw A2 without pins owns the same geometric properties with exception of the flight interruptions. Instead of that the screw A2 is characterized by 12 axial offsets of each flight with 25 mm offset. Both screws are

1 Table 1: Composition of the NR mixture

Ingredient	Proportions of recipe [phr]
NR	90
SBR	10
Plasticizer	3
Silica	68.75
Chalk	15
Coloring Agent	3
Minor Chemicals	16.7
Total	206.45

2 Table 2: Color thresholding values for NR

	NR blue		NR yellow	
	Range	Pass	Range	Pass
Red	255 – 255		25 – 170	
Green	0 – 255	X	0 – 0	
Blue	0 – 45	X	0 – 0	

3 Table 3: Geometrical parameters of both screws

	A	A2
Diameter	60 mm	
Number of zones	1	
Length	18.3 D (1098 mm)	
Channel Depth	12 mm	
Flight pitch	80 mm	
Offsets	12 pin levels with 6 pins each Pins: 6 mm diameter, 10 mm length	12 offset levels with 25 mm axial offset each
Number of channels	2	

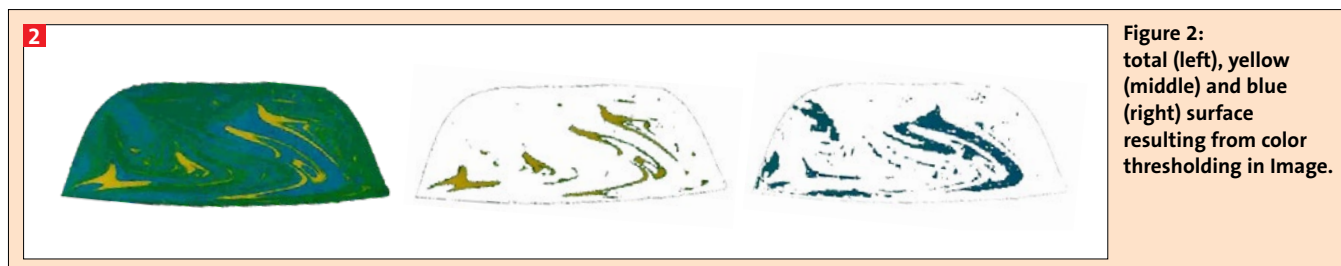


Figure 2: total (left), yellow (middle) and blue (right) surface resulting from color thresholding in Image.

shown in Figure 3. The geometrical parameters can be seen in Table 3.

Experimental design

The experimental design consists 12 trial points resulting from two screws, two different temperature profiles and three different screw speeds. Those variations form 6 different operating points for 2 screws and can be seen in Table 4. The same trial points were also investigated for different rubber mixtures in [10].

Both temperature profiles have in common that the barrel temperature is getting colder from the feed section to the screw tip. The die temperature is always set to 80 °C, while the screw temperature is varied, so that one time the screw is colder and one time warmer than the barrel. The first temperature profile with the warmer screw is chosen to achieve high throughputs, while the colder screw of temperature profile two should lead to a better mixing of the material according

to [5]. Each operating point is started and runned until the process becomes steady. The throughput, pressure and temperatures are measured from the stationary process. Therefore, a temperature measuring blade at the screw tip is used to record seven temperatures across the channel width. Also, four pressure transducers are used for documenting the pressure along the screw. Afterwards the extruder is dead-stopped. The temperature of all sections is then set to 140 °C, which is maximum possible because of the water temperature control. The rubber is vulcanized inside the barrel and afterwards the screw is taken out of the barrel together with the vulcanized rubber to take specimens from the channel.

Results

First of all, the influence of the different parameters on the throughput is analyzed starting with the influence of the two different screw concepts used for the investigations.

Regarding Figure 4 it can be seen, that the effect of the screw is strongly connected to the temperature profile used for processing. When profile one is in use, which is used to achieve high throughputs it can be seen, that the throughput of the pinless screw A2 is higher than that of the usually used screw A with pins. In contrast to that the throughputs for the second temperature profile are much closer to each other. The screw seems to have only a small influence on the throughput then. Sometimes the screw A has the higher throughput and sometimes A2, but with reference to the standard deviation it can be said, that they are really close to each other. This is a little bit in contrast to the results of the SBR and EPDM mixtures presented in [10] as there the screw A2 always showed a little reduced throughput of about 10% compared to the screw A with pins. So, there is definitely an interdependence of material properties and the screw design.

Taking a look at the influence of the temperature profile that is shown in Figure 5

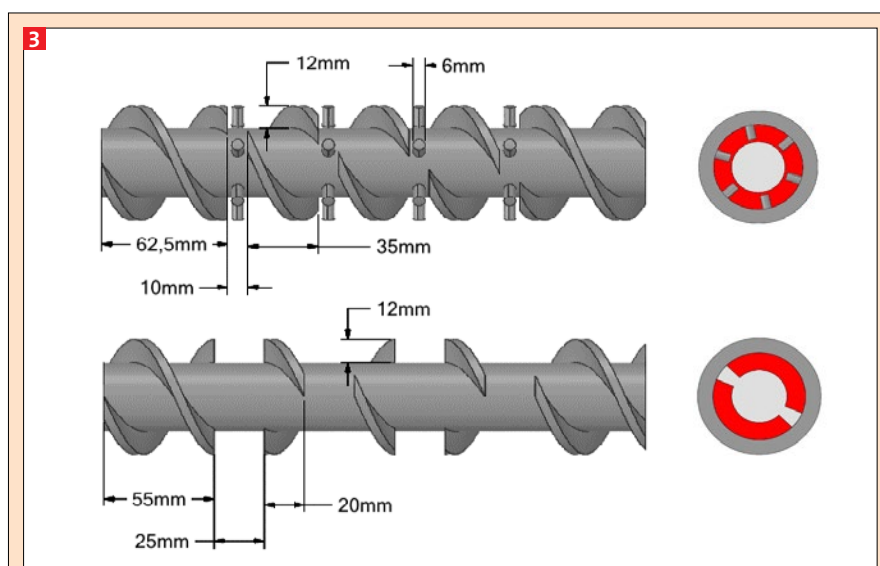


Figure 3: Geometry of Screw A with pins (top) and pinless screw A2 (bottom).

4 Table 4: Design of Experiments for the NR mixture			
Material	Screw	Screw Speed [rpm]	Temperature profile
NR	A	10	T1
			T2
		20	T1
			T2
		30	T1
			T2
	A2	10	T1
			T2
		20	T1
			T2
		30	T1
			T2

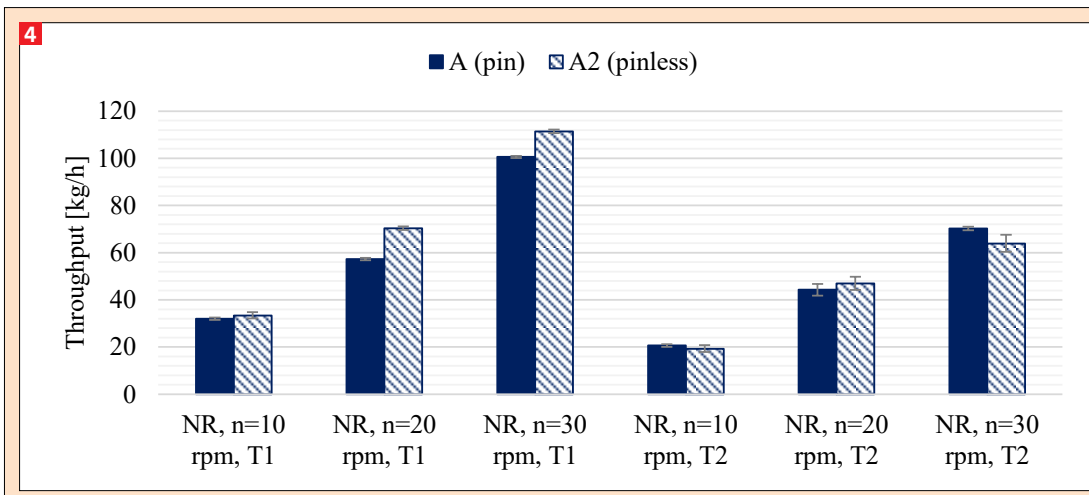


Figure 4:
Throughput of NR for
different screws.

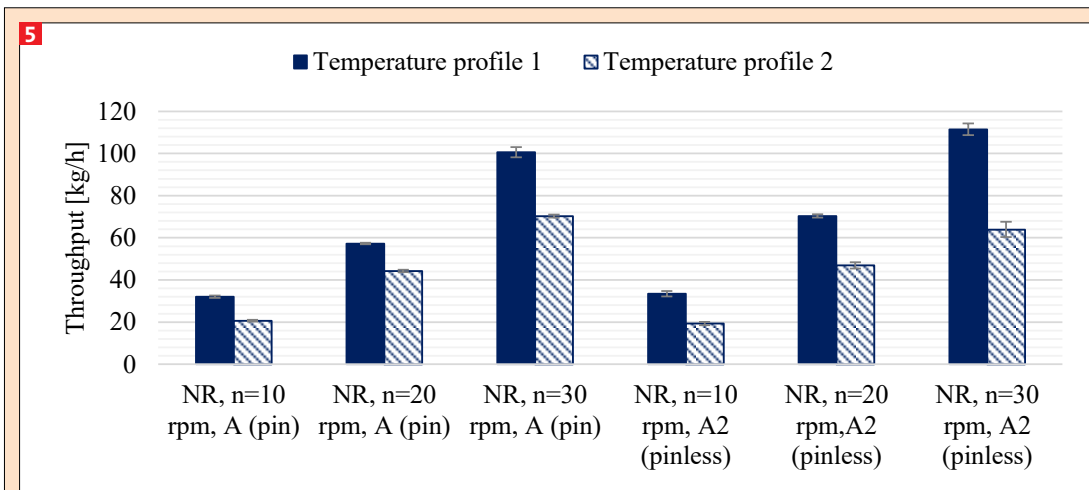


Figure 5:
Throughput of NR for
different temperature
profiles.

it can be seen, that temperature profile 1 is leading to a much higher throughput than temperature profile 2. This is in accordance to the expected effects of the temperature profiles chosen and was also seen for the other materials shown in [10], also the effect seen there was fewer. Furthermore, it can be seen, that the effect of the different temperature profiles is even bigger for the screw A2 without pins which is shown by the six columns on the right. So, there is a dependence between the screw design and the effect of temperature profiles. A higher screw speed usually leads to higher throughputs in the extrusion process. But this does not apply indefinitely. There is a limit at high screw speeds. This can usually be seen even when the limit is not reached yet, because of a decrease of the specific throughput with increasing screw speed. For the results shown in Figure 6 for NR this cannot be seen. The specific throughput is fluctuating a little with a tendency to an increase with higher screw speeds. This shows a con-

5 Table 5: Temperature profiles T1 and T2

	Temperature [°C]				
	Feed Zone	Barrel 1&2	Barrel 3	Screw	Die
T1	70	70	50	80	80
T2	80	80	60	50	80

6 Table 6: Mixed surfaces at the screw tip for different trial points

Trial				
Material	Screw	Screw Speed [rpm]	Temperature profile	Mixed surface at screw tip [%]
NR	A	10	T1	99.35
			T2	98.11
		20	T1	99.84
			T2	99.89
		30	T1	96.27
			T2	99.94
	A2	10	T1	71.19
			T2	99.56
		20	T1	61.66
			T2	99.67
		30	T1	60.69
			T2	99.67

nection to the material properties again that was not seen between EPDM and SBR, which were much more similar to each other than to the NR. So, for the throughput it can be concluded, that it is strongly dependent on the screw speed, temperature profile and

screw geometry. Furthermore, those factors are influencing each other and can therefore not be considered separately. Compared to [10] it can be said, that material properties are as well an important factor. The thermal properties of the extrudate are as well very important for the

evaluation of the process. On the one hand the maximum temperature in the channel shows the risk of scorch and on the other hand the difference between the highest and the lowest temperature in the channel cross-section is an indicator for the thermal mixing quality of the

6

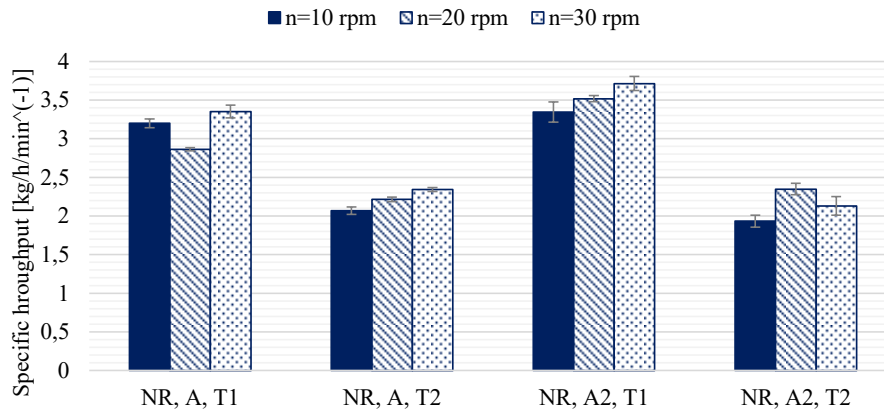


Figure 6:
Specific Throughput of
NR for three screw
speeds.

7

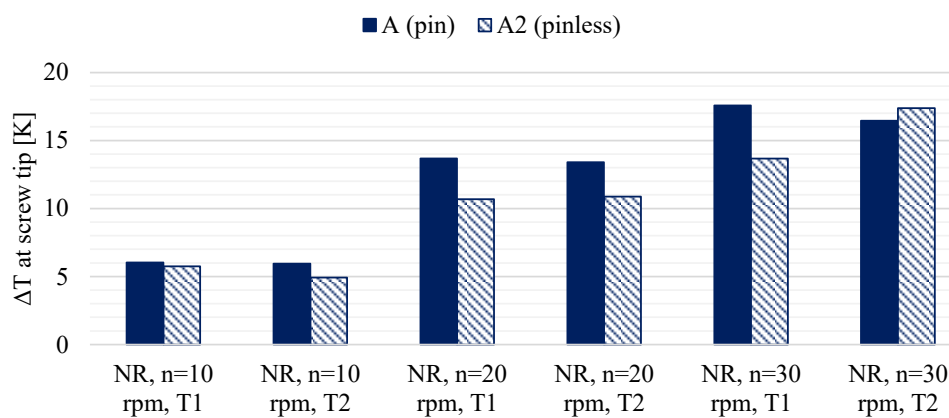


Figure 7:
ΔT for NR and different
trial points.

8

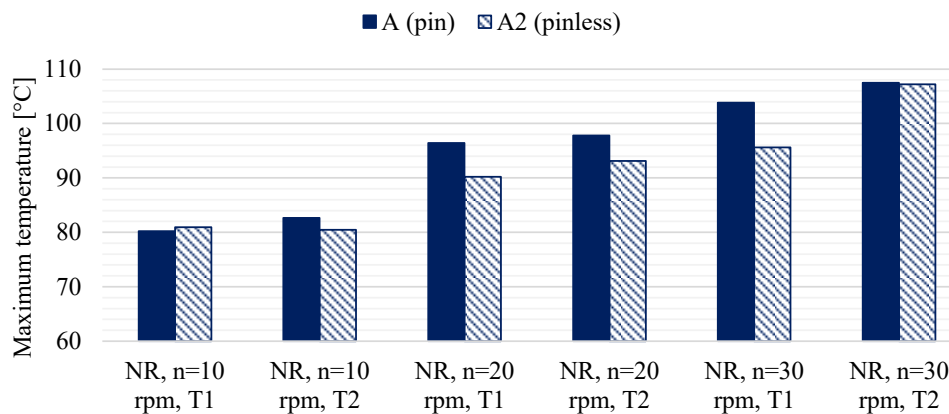


Figure 8:
maximum Temperature
for NR and
different trial points.

process. The lower the difference, the better the mixing. To determine those values the measurement blade at the screw tip was used, as the seven values from the temperature transducers are written to a protocol during the experiments automatically.

From Figure 7 one can see two different effects. First of all, it can be seen, that higher screw speeds lead to poorer thermal homogeneity when comparing the columns for 10, 20 and 30 rpm. The higher the screw speed, the higher is the resulting ΔT , not depending on the screw or temperature profile. In addition to that it can be seen that the pinless screw A2 leads to lower maximum temperature differences most of the time. That is as well in accordance to the results of the other materials. The pinless screw A2 showed a better thermal mixing quality for them as well. Therefore, it can be considered that flight offsets are good mixing elements regarding the thermal homogeneity and even a little bit better than the state of the art with pins. However, an influence of the temperature profile on the thermal mixing quality was not clearly visible.

Regarding the maximum temperature similar effects can be seen. For higher

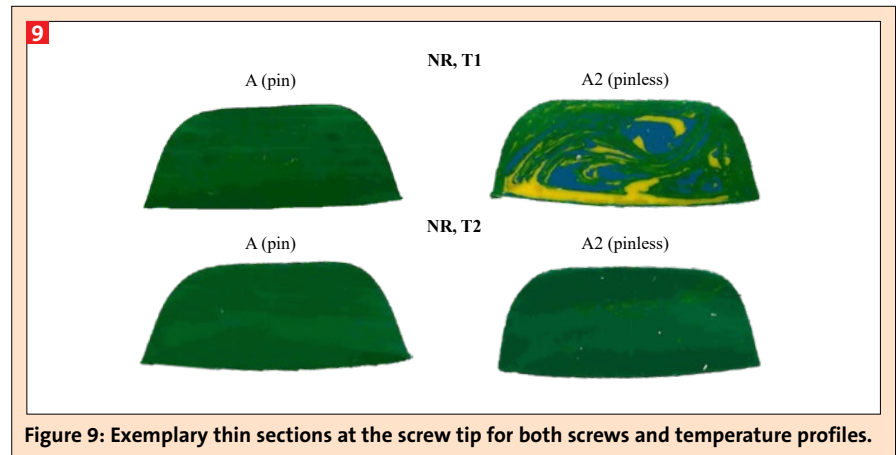


Figure 9: Exemplary thin sections at the screw tip for both screws and temperature profiles.

screw speeds the maximum temperature is rising due to higher dissipation because of shear, which can be seen, when comparing the columns from the left to the right in Figure 8. Furthermore, it can be seen that temperature profile one leads to a little lower maximum temperature than temperature profile two. When taking a look on the screws it can be seen, that the maximum temperature for both screws are close to each other, but for most points it is a little lower for the screw without pins, which was also observed for the EPDM and SBR

material in [10]. This might be due to the reduced shear stress that occurs because of the reduced flight length and missing pins for the screw A2. To get more reliable information on this, investigations on alternative concepts like A2 with other geometric parameters are necessary.

So, regarding the thermal mixing quality and the maximum temperature the screw A2 might be considered to be better, as a lower maximum temperature allows an increase of the screw speed, which improves the productivity.

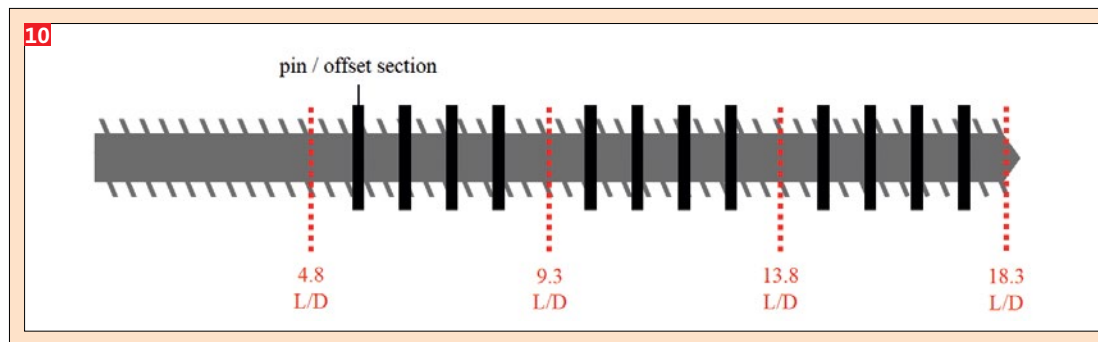


Figure 10: Position of specimens taken from the screw.

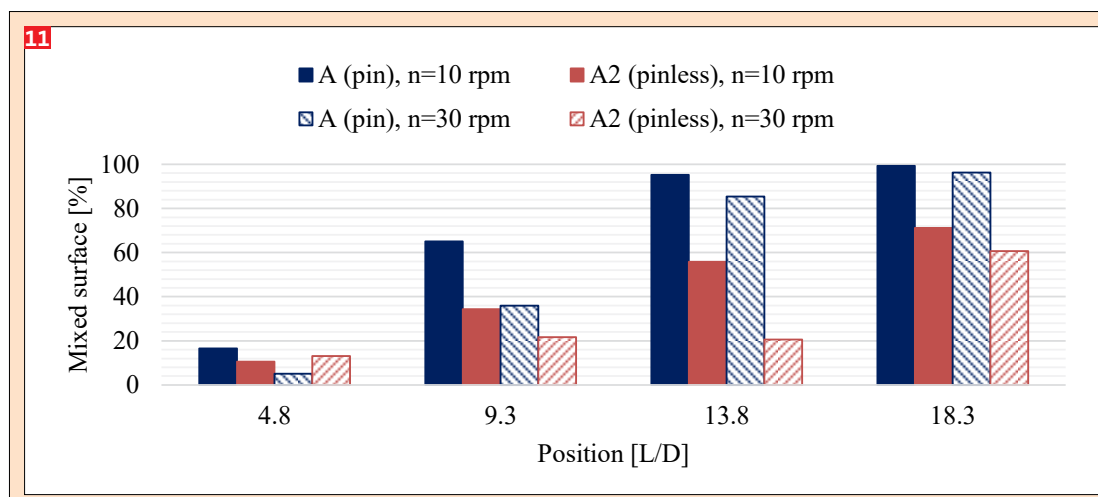
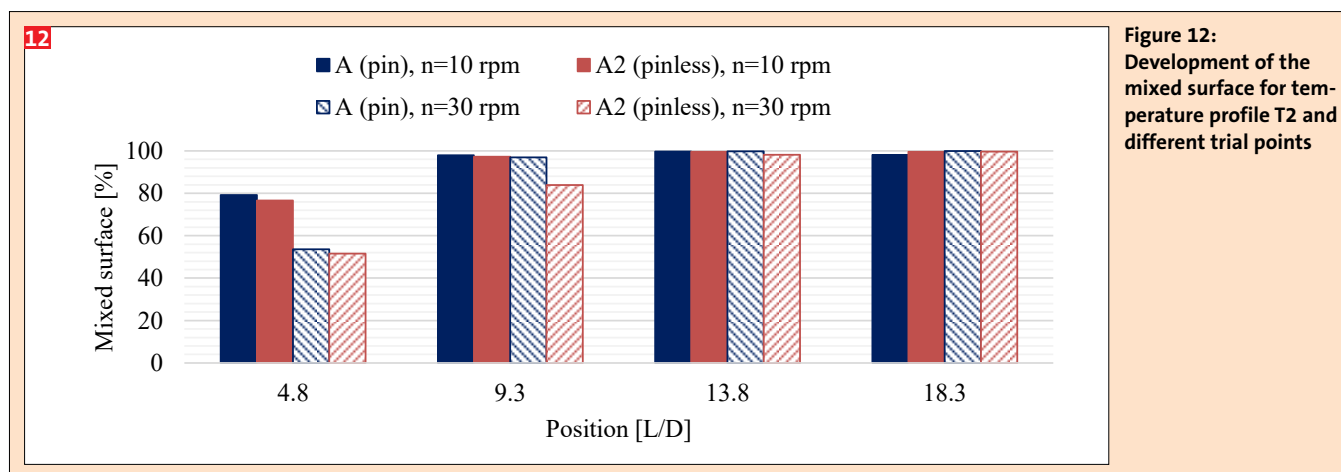


Figure 11: Development of the mixed surface for temperature profile T1 and different trial points.



The third important point to be considered is the material mixing quality, which can be analyzed by the mixed surface calculated from equation 1. In [10] both investigated materials were behaving equally and the material mixing quality was good and comparable for both screw concepts. This is different for the NR mixture investigated in this paper as Table 6 shows.

For the NR mixture the material homogenization is strongly dependent on the screw concepts connected to the temperature profile chosen. For the pinned screw the mixed surface at the screw tip is always very close to 100%, which indicates a high material homogeneity. For the pinless screw this can be seen as well for the temperature profile 2 which is the one chosen for better mixing quality. But if we change to the profile chosen for higher throughput, we can observe a significant decrease in mixing quality. The mixed surfaces of approximately 60 to 70% are an indicator for a very bad mixing quality, which can as well be seen by the thin sections shown in Figure 9.

This effect of poorer mixing quality for the pinless screw with temperature profile T1 can as well be seen, when taking into account the development of the mixing quality along the screw. Therefore, specimens were taken from 4 different positions along the screw shown in Figure 10. In Figure 11 it can be seen, that the pinned screw A delivers a continuous development of the mixed surface along the screw, reaching nearly 100% at the screw tip. The mixed surface is as well increasing along the pinless screw A2, but that development is much slower than that of the screw with pins, especially when compared at 30 rpm. In contrast to that Figure 12 shows the development of the mixed surface for the tem-

perature profile T2. For that temperature profile, which was chosen to reach a better mixing quality, both screws show a more or less equal increase of the mixed surface along the screw. Furthermore, they reach values near 100% much earlier due to the optimized temperature profile.

Conclusion and Outlook

Overall, it can be summarized that alternative screw concepts based on offsets of the flight can deliver comparable extrudate quality to the conventional concept of pin extruders for natural rubber. Depending on the temperature profile the material mixing quality can be equal. Furthermore, the investigated screw showed comparable throughputs, which is as well depending on the temperature profile. But actually, those criteria are counteracting. Either a higher throughput, or a good mixing and thermal homogeneity can be achieved with the pinless concepts for natural rubber. So, the suitability of different screw concepts is dependent on the processing conditions and as the comparison with [10] shows, as well on the material properties.

Therefore, it can be concluded, that screw concepts without pins show a high potential for use-cases in the industry, but they need further investigation, as the geometric design of the screws will have an influence on throughput and mixing quality. So, more screw geometries based on the concept of radial and axial flight offsets should be investigated. Because of the high costs of experimental trials, a simulation via CFD will be carried out for the new concepts, after the model is fitted to the already carried out experimental trials. As the aim is to evaluate the thermal and material mixing of the screws the model should

consider the cold core by building up a quasi two-phase model according to [11]. ■

Acknowledgement

This research was funded by IGF, grant number 22892 N. The IGF project "Alternative Schneckenkonzepte für kleine bis mittelgroße Kautschukextruder" IGF project no. 22892 N, of the Deutsche Kautschukgesellschaft e.V. (DKG), Zeppelinallee 69, 60487 Frankfurt am Main, Germany, was funded by the German Federal Ministry of Economics and Climate Protection via the DLR as part of the program for the promotion of joint industrial research (IGF) on the basis of a resolution of the German Bundestag.

REFERENCES

- [1] Statista, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/317771/umfrage/produktionsmenge-von-kautschuk-weltweit/> (2024).
- [2] Wirtschaftsverband der deutschen Kautschukindustrie e.V., <https://wdk.de/konjunktur/kautschukindustrie/> (2023).
- [3] Crowther, B.G., Rapra Technology Limited: Shawbury, United Kingdom (1998)
- [4] Abts, G., Carl Hanser Verlag: Munich, Germany (2007).
- [5] Röthemeyer, F.; Sommer, F., Carl Hanser Verlag: Munich, Germany (2013).
- [6] NN, Abschlussbericht zu IGF-Vorhaben Nr. 18485N (2018).
- [7] NN, Abschlussbericht zu IGF-Vorhaben Nr. 18487N (2018).
- [8] Schneider, C. A.; Rasband, W. S.; Eliceiri, K. W., Nature Methods 9 (2012).
- [9] Schadomsky, M., Ph.D., Paderborn University, Paderborn (2023).
- [10] Schmidt, L.; Bruening, F., DKT (2024).
- [11] Schall, C., Ph.D., Paderborn University, Paderborn (2023).

Natural Rubber · Silica-Silane Coupling · Model Vulcanisation · LC-MS-Analysis

The objective of the study was a better understanding of the coupling reaction between silanes and natural rubber (NR) in silica/silane systems. Liquid chromatography mass spectrometry (LC-MS), size exclusion chromatography (SEC), and direct injection mass spectrometry (DIMS) were employed to study the coupling reaction between silanes and squalene as a model substance for NR. Squalene/silane coupling products were formed by the reaction of squalene with bis (triethoxysilylpropyl) tetrasulfide (TESPT) and bis (triethoxysilylpropyl) disulfide (TESPD). TESPT is donating active sulfur to form thiols and a dimer with squalene. TESPd could only form squalene/silane products through thermal cleavage of its di sulfidic bond. These reaction products could also be qualitatively identified using SEC. As for the triethoxyoctylsilane (OCTEO), no reaction products were formed with squalene.

Untersuchung der Polymer-Silan-Kopplung in Naturkautschuk/Silica/Silan-Modellsystemen**Naturkautschuk · Silica-Silankopplung · Modellvulkanisation · LC-MS-Analysis**

Ziel der Studie war ein besseres Verständnis der Kopplungsreaktion zwischen Silanen und Naturkautschuk (NR) in Silica/Silan-Systemen. Flüssigchromatographie-Massenspektrometrie (LCMS), Größenausschlusschromatographie (SEC) und Direktinjektions-Massenspektrometrie (DIMS) wurden eingesetzt, um die Kopplungsreaktion zwischen Silanen und Squalen als Modellschubstanz für NR zu untersuchen. Squalen/Silan-Kopplungsprodukte wurden durch die Reaktion von Squalen mit Bis(triethoxysilylpropyl)tetrasulfid (TESPT) und Bis(triethoxysilylpropyl)disulfid (TESPD) gebildet. TESPT spendet aktiven Schwefel und bildet Thiole und ein Dimer mit Squalen. TESPd konnte Squalen/Silan-Produkte nur durch thermische Spaltung seiner Disulfidbindung bilden. Diese Reaktionsprodukte konnten auch mittels SEC qualitativ identifiziert werden. Beim Triethoxyoctylsilan (OCTEO) wurden keine Reaktionsprodukte mit Squalen gebildet.

Figures and Tables: By a kind approval of the authors.

Investigation of the Polymer Silane Coupling in Model Natural Rubber/Silica/Silane Systems

Introduction

The introduction of silica silane technology in the tire industry has significantly reduced the rolling resistance and improved wet traction properties of tires. s-SBR combined with silica/silane systems has been very successful in passenger car tire tread formulations [1,2]. Despite this success, the implementation of silica/silane systems in natural rubber truck tire formulations has often yielded different results; thus indicating that the reinforcement mechanism of the silica/silane system in natural rubber is different from that in s-SBR. Also, silica/silane reinforcement of natural rubber is not effective with regards to strength, rolling resistance, and abrasion. Some reasons have been advanced for this difference in reinforcement mechanism of silica/silane systems in natural rubber and s-SBR. Among these is an insufficient strain induced crystallisation of natural rubber in the presence of silica filler [3–8]. Furthermore, insufficient polymer filler coupling due to an ineffective reaction and coupling of silanes with natural rubber as well as interference of non rubber constituents (proteins, phospholipids, fatty acids etc.) on the silanization reaction has also been advanced as reasons [9,10]. A combination of silica technology with the high tear strength property of natural rubber, resulting from its self reinforcing mechanism from strain induced crystallisation, may lead to truck tires with optimized properties.

The introduction of silica fillers into the rubber and tire industry, especially for solution styrene butadiene rubber (s-SBR) tread compounds, led to the development of special silanes to solve the problem of compatibility between polar silica fillers and the predominantly non polar rubbers. These silanes, through their ethoxy groups can react with the silanol groups on silica surface thereby hydrophobizing the silica surface. Ethanol is produced in this reaction. The hydrophobized silica surface can then be easily bonded to the less polar polymer chains during compounding and vulcanization of rubbers by means of physical and che-

mical bonds [11–13]. The silanes used in the rubber and tire industry can be broadly divided into mono-functional and bi-functional silanes. Mono-functional silanes are characterized by two structural units; the silica reactive unit which in most cases are ethoxy groups and the organic spacer unit. These silanes were solely developed just to increase the compatibility between non polar rubbers and polar silica fillers.

Bi-functional silanes, on the other hand, were developed to improve the reinforcement potential of silica fillers since they are able to bond with both silica fillers and polymer chains. The basic units of bi-functional silanes are; a silica reactive unit, an organic spacer, and a polymer reactive unit (sulfur containing groups) [14]. These bi-functional silanes, through their sulfur-groups can react with rubbers to form rubber-silane bonds, which if not controlled properly during the compounding and mixing process may lead to pre-scorching, thereby making further processing difficult [15–19]. The effect of the chemical structure of different silanes on the properties of silica/silane filled rubbers is therefore of great importance since these silanes impart different properties on cured rubbers [20–22].

Autor

Claude Arreyngang Tabe, Ulrich Giese, Hannover, Germany

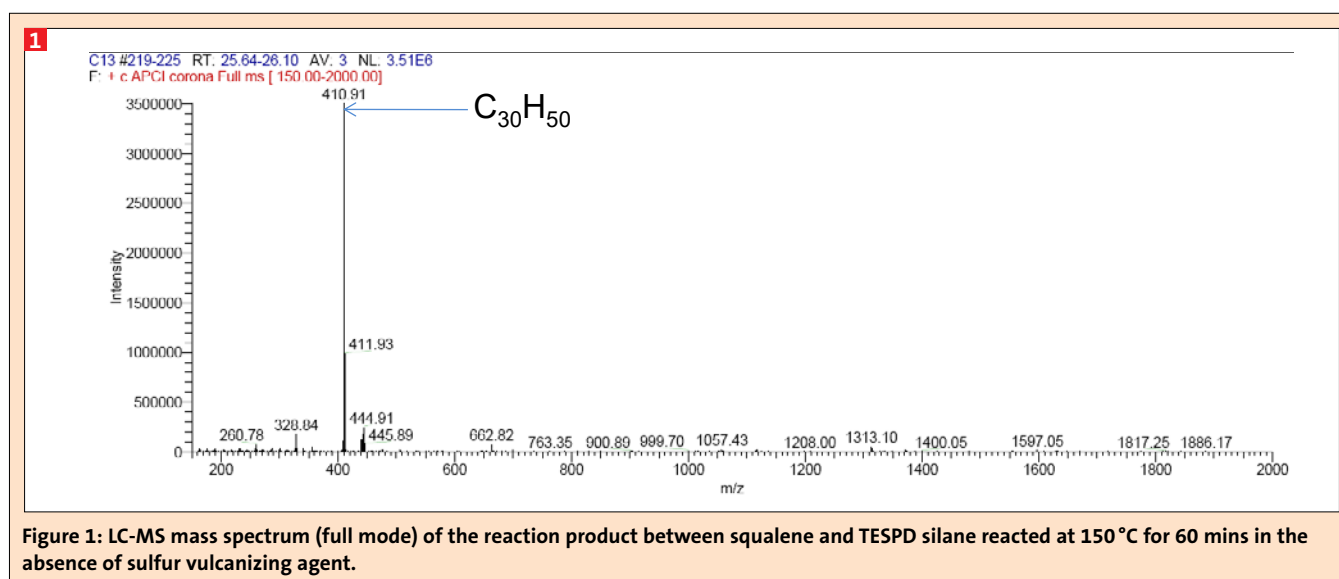
Corresponding Author:

Prof. Dr. Ulrich Giese
Deutsches Institut für Kautschuk-technologie e.V.

Eupener Straße 33

30519 Hannover, Germany

E-Mail: Ulrich.Giese@DIKautschuk.de



Model compound vulcanization is one of the few methods that can be employed to study the mechanism of the vulcanization reaction and the polymer silane coupling reaction. It provides polymer scientists with a unique possibility of combining highly sophisticated analytical techniques such as liquid chromatography, mass spectroscopy, gas chromatography, and size exclusion chromatography to study and gain more insight into the processes involved in the vulcanization of rubbers, as well as the coupling reaction between polymers and silanes. LC-MS has been widely employed to carry out these investigations. Vega et al [23], Giansanti et al [24], and Giese et al [25] successfully employed this technique to identify squalene intermediate and end products in model compound vulcanization studies.

Instead of polymers, model substances which are mostly liquids and are therefore easily analysable by many analytical techniques are used for these studies. These model substances have similar properties to rubbers except for their lower molecular weights and therefore can simulate the behaviour of real rubbers. This paper focuses on utilizing the model compound vulcanization method to investigate the coupling reaction between different silanes in silica/silane systems and squalene as model for NR, well known, that the trans configuration of squalene is not completely correlating to the high cis content in NR. Nevertheless squalene is used as a model substance for natural rubber while bis (triethoxysilylpropyl)tetrasulfide (TESPT) and bis (triethoxysilylpropyl) disulfide (TESPD)

and triethoxyoctylsilane (OCTEO) are the investigated silanes. TESPT and TESPd as sulfur containing silanes were utilized to study the effect of the sulfur chain length and its thermal stability on the coupling reaction between sulphide, silanes and natural rubber. Conversely, a non-sulfide silane (OCTEO) is used to investigate the reaction mechanism of mono-functional, non-sulfide silanes with natural rubber and the improvement of the polymer filler interaction just by hydrophobizing of the filler surface. The reaction products are analysed by liquid chromatography mass spectrometry (LC-MS), size exclusion chromatography (SEC) and direct injection mass spectrometry (DIMS).

Experimental

Materials

Squalene (M_w : 410.8 g/mol) from Carl Roth was used as a model substance for natural rubber whereas TESPT (M_w : 538.95 g/mol), TESPd (M_w : 474.84 g/mol), and OCTEO (M_w : 276.49 g/mol) silanes were provided by Evonik Resource Efficiency. The

N-cyclohexyl-2-benzothiazole sulfenamide (CBS) accelerator and zinc oxide (ZnO) activator were respectively supplied by Lanxess Germany and Grillo Werke. Meanwhile, the sulfur vulcanizing agent and stearic acid activator were obtained from Solvay and BCD Chemie, respectively.

In order to prepare the vulcanized samples for analysis with the size exclusion chromatograph, liquid chromatography mass spectrometer and direct injection mass spectrometer, tetrahydrofuran (THF) from Carl Roth, methanol (Carl Roth), and water acquired from Honeywell Speciality Chemicals were respectively used as solvents and the mobile phases for these systems.

Squalene-silane coupling reaction

Due to the sensitivity of squalene against oxidation and the volatility of squalene and silanes at high temperatures, investigation of the reaction between both substances had to be performed in both an autoclave and in an inert gas atmosphere. For this reasons, a special autoclave lid was developed. This autoclave lid through the help of valves enables flushing of the autoclave with nitrogen thereby ensuring an oxygen free environment and therefore preventing oxidation of the double bonds in squalene. A thermometer and temperature sensor could also be inserted into the autoclave through one of its valves to measure and regulate the reaction temperature. The metal autoclave was heated using a heating plate with an attached magnetic stirrer.

All the ingredients (Table 1) were weighed in a beaker and stirred for 15 mins

1 Table 1: Compound recipe for the reaction between squalene and different silanes (phr: parts per hundred rubber)

Ingredient	Amount/phr	Amount/g
Squalene	100.0	20.0
*Silane	10.0	2.0
CBS	3.9	0.78
Sulfur	11.2	2.24
Zinc oxide	5.9	1.18
Stearic acid	3.1	0.42
* TESPT, TESPd and OCTEO		

at room temperature. The stirred reaction mixture was then transferred into the sample holder of the autoclave. Oxygen was flushed out of the autoclave with the help of a vacuum pump while nitrogen was injected into the autoclave. This process was repeated several times to ensure an oxygen free atmosphere. The reaction was started by allowing the reaction mixture to flow into the autoclave, upon attainment of the reaction temperature (150 °C), by opening one of the valves. In order to ensure homogeneity of the reaction mixture, the reaction mixture was stirred throughout the reaction using a magnetic stirrer. The reaction was stopped after 60 mins by cooling the autoclave in a water bath.

Analysis by means of size exclusion chromatography (SEC)

For these analyses, 4 mg/ml of the cold quenched samples were prepared by dissolving 40 mg of the reaction mixture in 10 ml tetrahydrofuran (THF). These solutions were then analysed in a size exclusion chromatograph (Agilent Spectra Physics SP 8100) equipped with an ultraviolet/visible (G1314A) and a refractive index (RI G1362A) detectors. The wavelength for the ultraviolet/visible detection was set at 230 nm meanwhile the injection volume was 20 µl at a flowrate of 5 ml/min. The mobile phase was THF (stabilized with butylated hydrotoluene). A mixed bed column made up of polystyrene divinylbenzene gel with pore sizes from 50 to 500 Å (Polymer Standard Services) was used to separate the various components of the reaction mixture. Calibration of the system was carried out

2 Table 2: Gradient program for the LC-MS analysis of model compound vulcanization products

Time/mins	Methanol/%	Water/%	Flow rate/[ml/min]
0	70	30	0.9
9	90	10	0.9
11	90	10	0.9
20	100	0	0.9
25	100	0	0.9
30	70	30	0.9
35	70	30	0.9

using a polystyrene standard mixture with molar masses of 580, 1750, 5500, and 17 600 g/mol.

Liquid chromatography-mass-spectrometry analysis

In order to analyse the products from the reaction between squalene and the different silanes in the LC-MS system (LCQ Finnigan Surveyor), 200 µl/ml of the samples were prepared in methanol solvent. 1 ml of each sample was then placed in the autosampler of the LC-MS equipment from which 20 µl was injected into the high performance liquid chromatographic (HPLC, Finnigan Surveyor) system. A gradient elution system on the basis of methanol/water (see Table [2]) was used for the separation. A flowrate of 0.9 ml/min was employed for the separation of the various components in the reaction mixtures.

The HPLC column was a 100 mm long and 3 µm particle size (100 × 3 mm) RP 18 reverse phase column, and the detection system was an ultraviolet (UV) detector operating at a wavelength of 230 nm. An ion trap mass spectrometer (MS), which is serially coupled to the HPLC sys-

tem through an interface, was used to identify the separated components of the reaction mixture from the HPLC system. Ionisation of the sample species in the interface was performed using an atmospheric pressure chemical ionisation (APCI) source (voltage: 5 kV, temperature: 450 °C). The MS measurements were performed in full scan and SIM (selected ion monitoring) mode directed to the different mass ranges; thiols (400 – 550 m/z), dimers (800 – 1100 m/z) and the respective ranges for possible squalene/silane products.

Analysis through direct injection mass spectrometry (DIMS)

Since not all the products from the model compound vulcanization of squalene could be identified in the LC-MS system, probably due to a very high affinity of some of the products (especially the dimers) to the column material, a direct injection mass spectrometric method was developed to identify especially the squalene dimers. This method is quite similar to the LC-MS method except for the fact that the sample to be analysed is directly injected into the MS with the

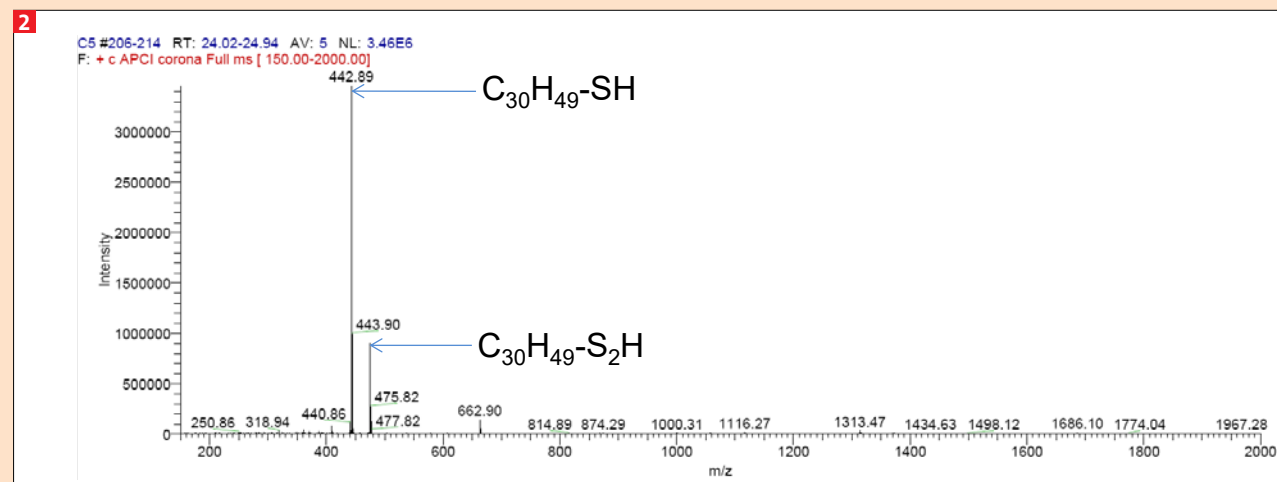


Figure 2: LC-MS mass spectrum of squalene vulcanized with sulfur vulcanizing agent at 150 °C for 60 mins.

help of an injection pump. Therefore, no chromatographic separation of the different components in the mixture is carried out. Instead, there is a direct identification of the sample components through ionisation with the APCI ionisation technique and separation of the ions into their various mass/charge (m/z) ratios in the mass spectrometer.

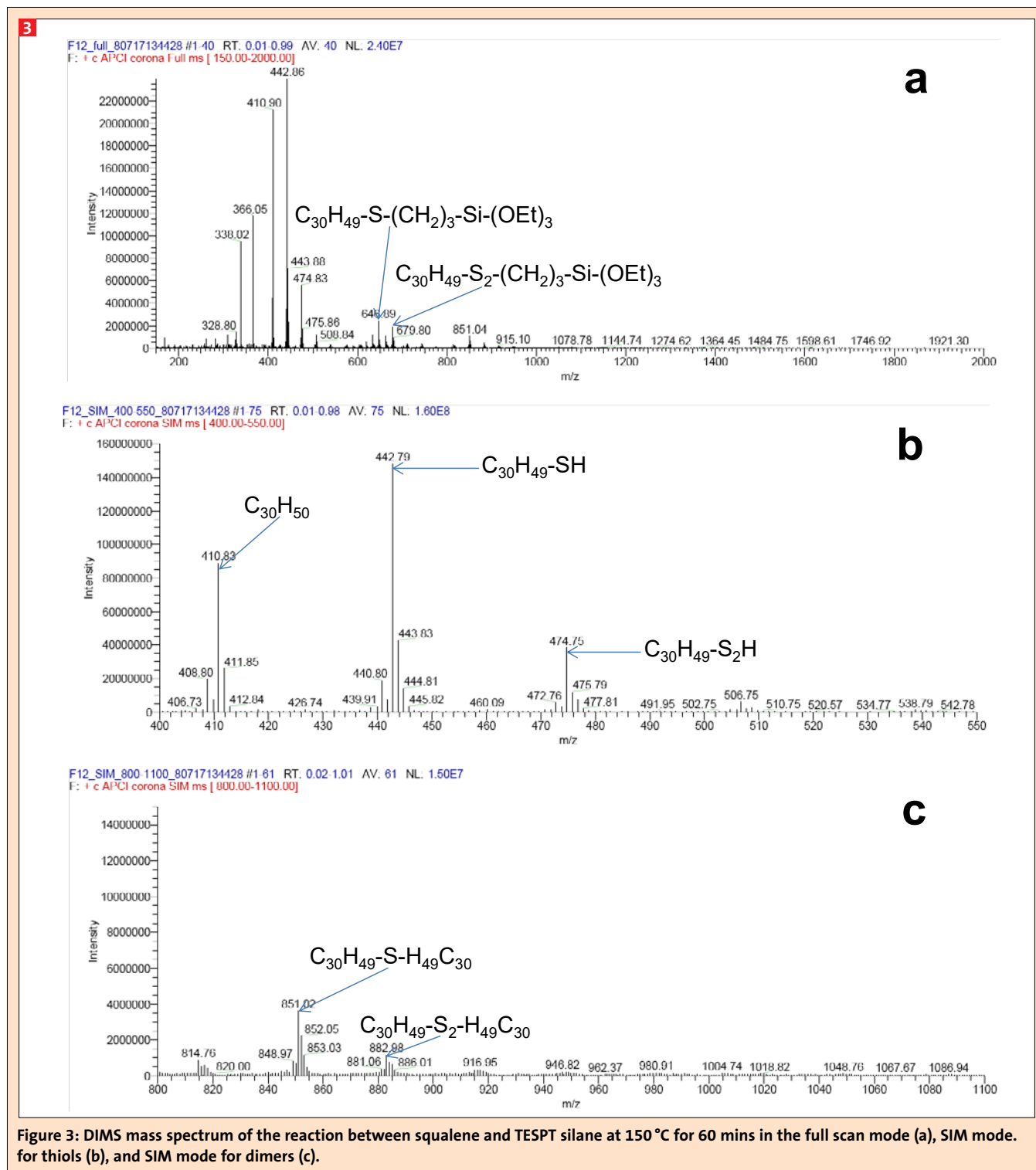
Results and discussion

LC-MS analysis of the reaction products between squalene and silanes

LC-MS involves separation of the various components present in a mixture in the separation column of the HPLC, and then ionisation and detection of the ions in the interface unit (APCI) and mass spec-

trometer. Result from the LC-MS analysis of the products from the reaction of squalene with the TESPD silane reacted at 150 °C for 60 mins in the absence of sulfur is shown in Figure 1.

The result revealed that no possible reaction products are formed between squalene and the TESPD silane under this reaction condition since only squa-

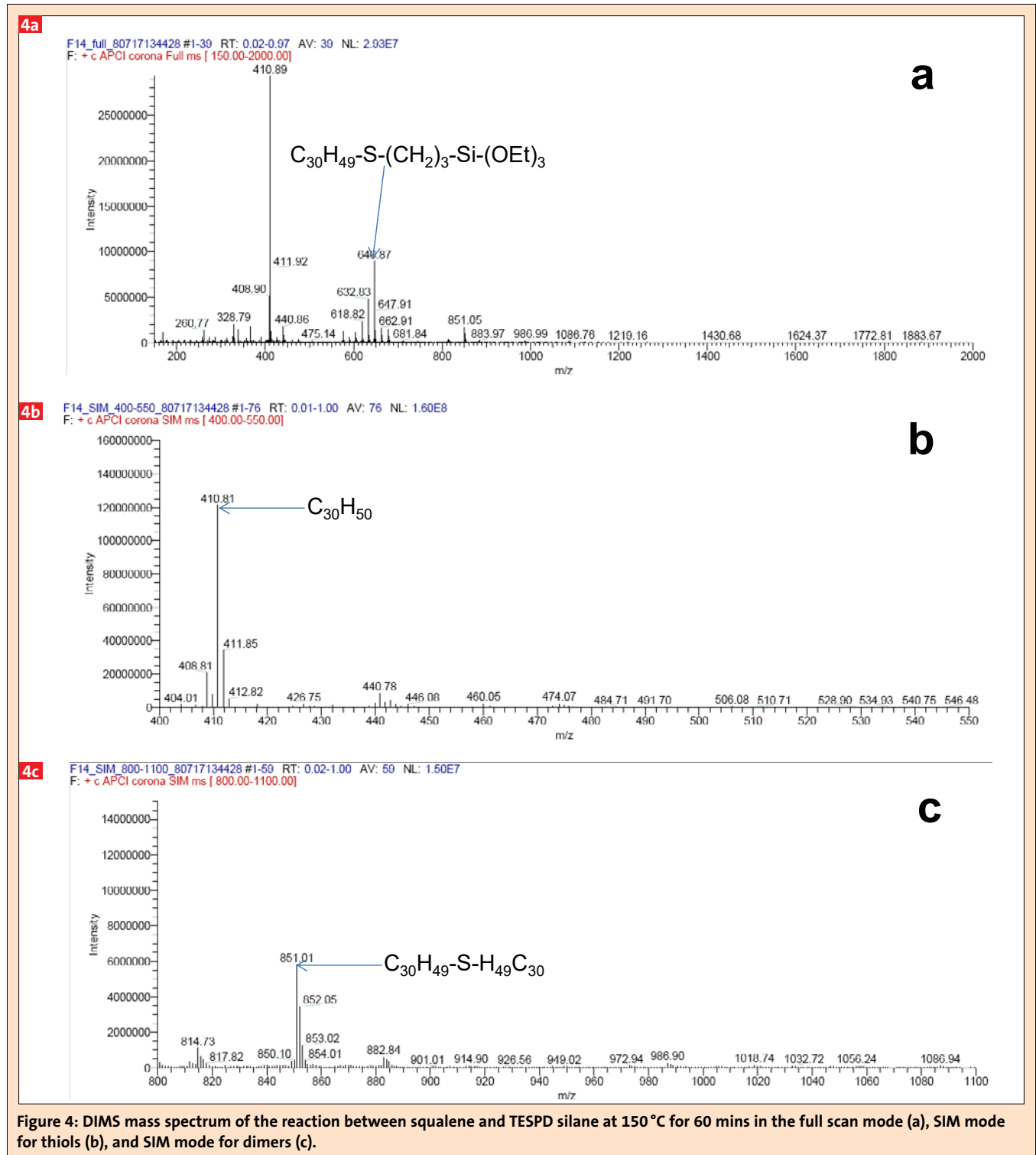


lene could be detected. This same observation was made for the reaction between squalene and TESPT and OCTEO silanes. These results were quite unusual because TESPT and TESPd bifunctional silanes with their sulfur groups should be able to couple with squalene under these reaction conditions. The result is only plausible for the

mono functional OCTEO silane which does not contain sulfur. This result therefore questions the suitability of the employed LC-MS method in identifying these products.

The suitability of the employed LC-MS separation and detection system for the analysis of possible reaction products between silanes and squalene was

further tested by vulcanizing squalene with sulfur at 150 °C for 60 mins. The reaction products from this reaction were analysed in the LC-MS system under the same conditions as with the analysis of the products from the squalene/silane reactions. As seen in Figure 2, only thiols with sulfur chain lengths of S_1 and S_2 were detected as reaction products. Neit-

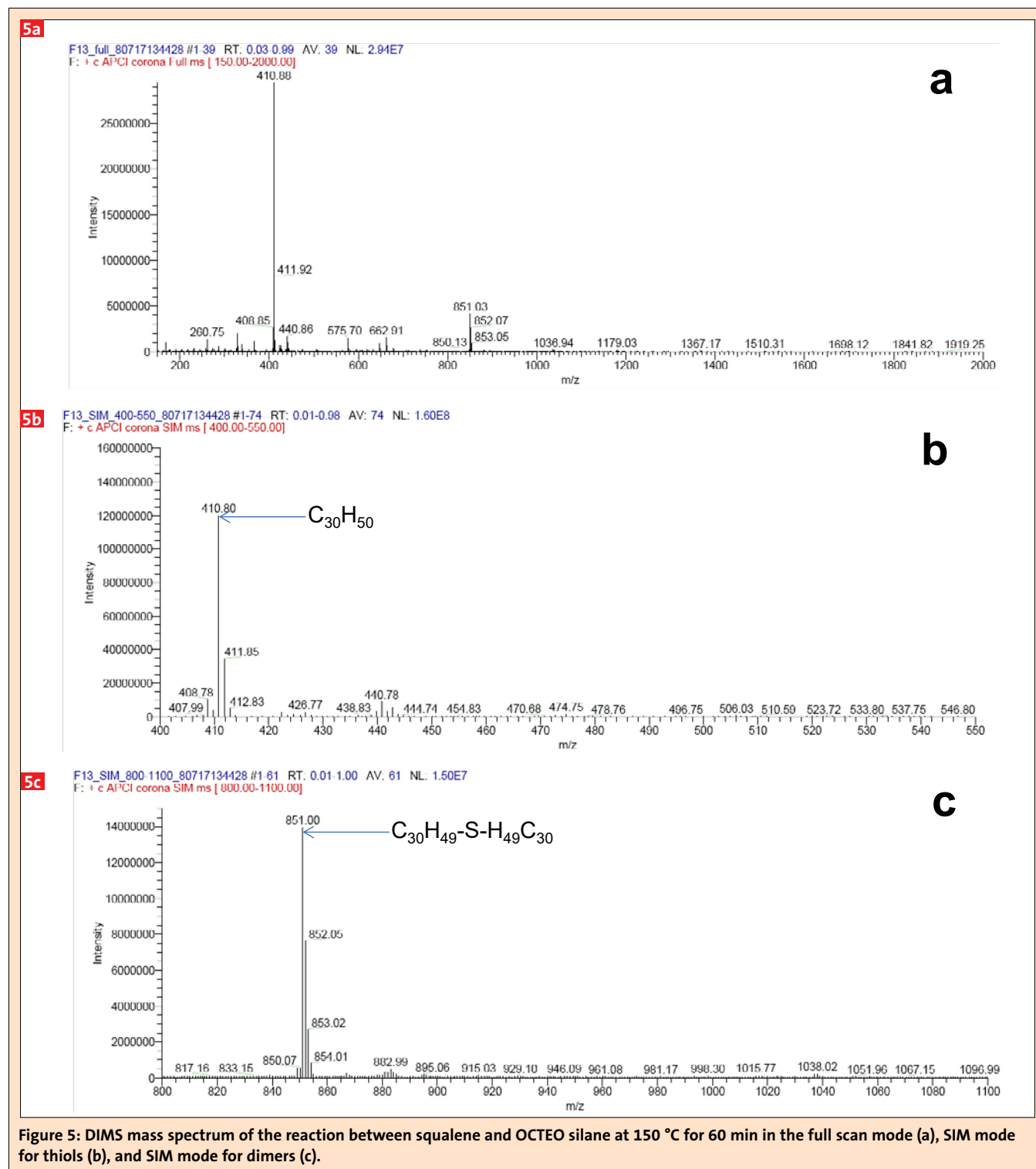


her further thiols nor dimers were found suggesting the need to optimize the analytical method since these reaction products have been detected by other researchers in model compound vulcanization of squalene and other model substances [23, 26].

The detection of just thiols with S_1 and S_2 sulfur chain lengths could probably

be due to a strong interaction between the other components of the vulcanized mixture (thiols and dimers) and the HPLC separation column. Such strong interaction or chemical reactions to the metal surfaces could lead to a permanent absorption of these components onto the separation column; thus, these components would not arrive the mass

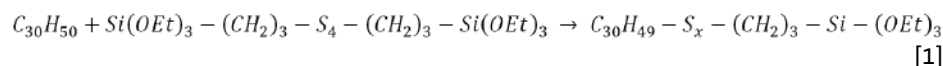
spectrometer for detection. Unfortunately, these undetected reaction products were still not found after LC-MS measurements in the selected ion monitoring (SIM) mode and optimization of the concentration of the eluent system. The detection of these products was only possible with the direct injection mass spectroscopic (DIMS) method.



Direct injection mass spectrometric analysis of the reaction products between squalene and silanes

Direct injection mass spectroscopy (DIMS) was employed to qualitatively analyse the products from the reactions between squalene and the various silanes used in this study. Results from DIMS analysis of the reaction between squalene and TESPT silane at 150 °C for 60 mins in the absence of sulfur are summarized in Figure 3.

The reaction of squalene with the TESPT silane measured in the full scan mode (Figure 3a) shows the formation of squalene/silane reaction products at m/z ratios of 647 and 680. These reaction products at m/z of 647 and 680 were identified as the mono sulfidic $C_{30}H_{49}-S-(CH_2)_3-Si-(OEt)_3$ and di sulfidic $C_{30}H_{49}-S_2-(CH_2)_3-Si-(OEt)_3$ squalene/silane reaction products, respectively. These products are formed through thermal cleavage of the tetra-sulfidic bonds of the TESPT silane and its subsequent attachment to squalene. TESPT with a tetra-sulfidic chain is able to form both mono- and di-sulfidic squalene/silane reaction products. The reaction between squalene and TESPT is shown in equation 1 below.



Whereby $x = 1$ or 2 for mono and di-sulfidic squalene/silane reaction products respectively.

The exact mechanism of this reaction is not yet established. One of the suggested mechanisms is through addition of the thermally cleaved silane $[-S_x-(CH_2)_3-Si-(OEt)_3]$ onto a double bond in the squalene molecule. On the contrary, the radical mechanism proposes the abstraction of a hydrogen atom (H) from the allylic position to a double bond in a squalene molecule and subsequent reaction with a thiol radical $(-S-(CH_2)_3-Si-(OEt)_3)$ [27–32]. NMR analysis can help elucidate the exact mechanism of the formation of these reaction products. Figures 3b and 3c show thiols and dimers with mono and di sulfidic chain lengths formed from the reaction between squalene and the TESPT silane. These results suggest donation of active sulfur under these reaction conditions by TESPT silane for the formation of the reaction products [33]. The results also confirm the bifunctionality of the TESPT silane and the pre-scorch phenomenon as a result of its thermal instability at high temperatures. This phenomenon has often been reported from the use of this silane at temperatures above 150 °C [34]. The formation of thiols and dimers is evidence that the TESPT silane can donate active sulfur to

in the DIMS of the products from the reaction between squalene and TESPD silane. A mono sulfidic reaction product, $C_{30}H_{49}-S-(CH_2)_3-Si-(OEt)_3$ is formed in the reaction between squalene and this silane. This product is formed through thermal cleavage of the di sulfidic unit of the silane and its coupling to the squalene. TESPD silane with a di sulfidic bond is able to split into two equal units under this reaction condition to form the mono sulfidic units $-S-(CH_2)_3-Si-(OEt)_3$, which can easily couple to a polymer chain. This result agrees with expectations that this silane can couple to a polymer chain during compounding and vulcanization of rubber compounds.

Another important observation is that no thiols were formed in this reaction (Figure 4b). This indicates that TESPD silane unlike its TESPT counterpart does not donate active sulfur into the vulcanization system during compounding. TESPD silane is generally known for its thermal stability thereby not pre scorching during compounding. The mono sulfidic squalene dimer found in figure 4c is probably from impurities from the accelerator/activators and from a contamination of the teflon reaction vessel used to perform these reactions.

Compared with TESPT and TESPD silanes, the OCTEO silane does not form any reaction product with squalene (Figure 5a to 5c).

This is the expected result since this silane was developed solely to hydrophobize the surface of silica fillers. A reaction between the OCTEO silane and squalene can only occur in the presence of sulfur. The mono sulfidic squalene dimer found in the measurement in the SIM mode within the range of dimers (m/z 800–1100) is a contamination from both the accelerator and the teflon vessel used to perform these experiments.

Size exclusion chromatographic analysis of the squalene-silane reaction products

In order to study the possible coupling reactions between silanes and squalene (a model substance for natural rubber), products from the model compound vulcanization of squalene reacted with different silanes at 150 °C for 60 mins were analysed in the size exclusion chromatography. Results from the reactions of TESPT, TESPD, and OCTEO silanes with squalene in the absence of sulfur are shown in the chromatogram in Figure 6. Figure 6 shows a squalene peak and peaks that could be attributed to possib-

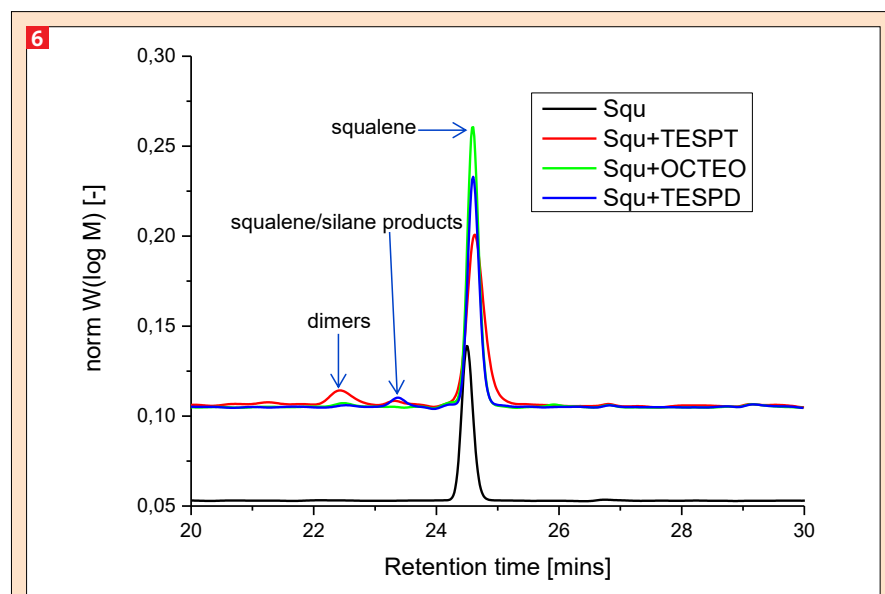


Figure 6: Size exclusion chromatogram of squalene reacted with the TESPT, TESPD, and OCTEO silanes at 150 °C for 60 mins in the absence of sulfur. (*Squ: squalene)

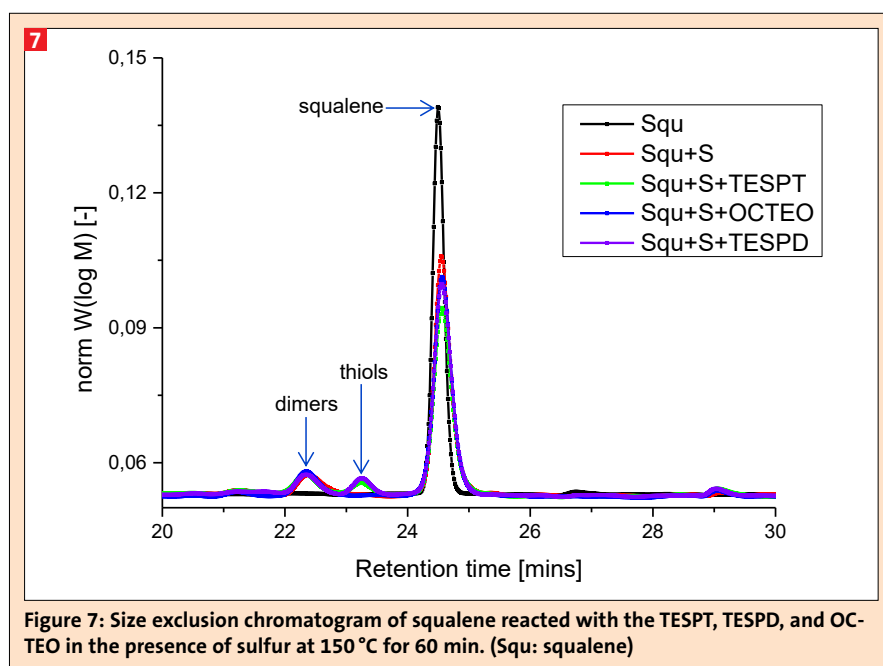


Figure 7: Size exclusion chromatogram of squalene reacted with the TESPT, TESP, and OCTEO in the presence of sulfur at 150 °C for 60 min. (Squ: squalene)

le squalene/silane products in the case of the reaction of squalene with TESPT and TESP silanes. As for its reaction with the OCTEO silane, squalene appears not to form any products with this silane in the absence of sulfur. This result is expected since OCTEO silane does not contain sulfur; consequently, it cannot react with squalene in the absence of sulfur. The TESPT and TESP silanes on the contrary do contain sulfur and therefore under suitable conditions can react with squalene, even in the absence of sulfur. Assignment of these peaks is based on the molar masses of the possible products and the principle of size exclusion chromatography. Squalene with a molar mass of 410.7 g/mol will diffuse deep into the smaller pores of the separation column of the chromatographic equipment thereby spending a relatively longer time in the separation column. This is the reason the squalene peak appears last in the chromatogram after 24.5 mins. Squalene/silane products and squalene dimers on the other hand have larger molar masses within the range 647–1100 g/mol and will therefore appear relatively earlier on the SEC chromatogram. This same trend is observed for the systems (Figure 7) in which squalene is reacted with TESPT, TESP, and OCTEO silanes in the presence of sulfur. The vulcanization products appear according to their molar masses with dimers appearing before thiols while squalene appears last. Also, the peaks for thiols and dimers are not observed in the system

containing just squalene (without sulfur). This is plausible because no products are expected in the system containing just squalene. Assignment of these peaks to the various reaction products was possible only with the help of the results from LC-MS and DIMS.

Conclusion

The polymer-silane coupling reaction was studied using squalene as a model substance for natural rubber to simulate the coupling of natural rubber to different silanes. It was observed from the analysis of the reaction products in DIMS that TESPT and TESP silanes can react with squalene in the absence of sulfur to form squalene/silane products. TESPT silane can also donate active sulfur into the vulcanization system forming thiols and dimers. This observation was not made with TESP silane since it could only form products with squalene through thermal cleavage of its S_2 sulfidic bonds. TESP silane appears to be more thermally stable than its TESPT counterpart. Unlike TESPT and TESP silanes, no possible squalene/silane products were formed by the OCTEO silane in the absence of sulfur. The squalene dimer with a mass/charge (m/z) of 851 is formed as a result of impurities from the accelerator and contamination from the teflon reaction vessel.

Qualitative determination of the reaction products was also possible with the size exclusion chromatograph. Reaction products that could be assigned to squalene/silane, thiols, and dimers were

observed from analysis using the size exclusion chromatographic technique. It can therefore be concluded from this study that TESPT and TESP silanes can undergo effective coupling reactions with natural rubber in the absence of sulfur through thermal cleavage of their sulfidic bonds meanwhile such a coupling reaction is not possible with the OCTEO silane. ■

REFERENCES

- [1] R. Rauline, EP Patent 0 501227A1, to Michelin and Cie, February 9, (1992).
- [2] S. Wolff, Kautsch. Gummi Kunstst. 41, 674 (1988).
- [3] S. Kohjiya, P. Junkong, Y. Ikeda, Kautsch. Gummi Kunstst., 38, KGK 10, (2017).
- [4] P. Junkong, T. Ohashi, T. Phakkeeree, Y. Sakaki, Y. Ikeda, Kautsch. Gummi Kunstst., 38, KGK 07-8 (2017).
- [5] B. Huneau, Rubber Chemistry and Technology, 2011, 84, 3, 425.
- [6] T. Spratte, J. Plagge, M. Wunde, M. Klüppel, Polymer 115, 12, (2017).
- [7] J. Plagge, M. Klüppel, Polymer Testing 66, 87, (2018).
- [8] S. Trabelsi, P.-A. Albouy, J. Rault, Laboratoire de Physique des Solides, UMR 8502, June 26, (2003).
- [9] S.S. Sarkawai, W.K. Dierkes, J.W.M. Noordermeer, European Polymer Journal, 49, 3199-3209 (2013).
- [10] A. Blume, J. Fahr, C. Morisse, Rubber World, 24-29 (2012).
- [11] J. W. ten Brinke, S. C. Debnath, L. A. E. M. Reuvekamp, J. W. M. Noordermeer; compos. Sci. Tech., 63, 1165 (2003).
- [12] Hasse, O. Klockmann; Kautsch. Gummi Kunstst., 55, 5 (2002).
- [13] M. L. Kavelich, J. L. König; Rubber Chem. Technol., 71, 300 (1998).
- [14] H.-D. Luginsland and C. Röben: International Polymer Science and Technology, 42 No. x, (2015).
- [15] U. Görl, A. Hunsche, A. Müller and H. G. Koban: Rubber Chem. Technol., 70, 608 (1997).
- [16] W. Meon, A. Blume, H.-D. Luginsland and S. Uhrandt: "Silica and silane" in Rubber Compounding Chemistry and Applications, New York (2004).
- [17] A. Hunsche, U. Görl, A. Müller, M. Knaack and Th. Göbel: Kautsch. Gummi Kunstst. 50, 881 (1997).
- [18] J. W. M. Noordermeer and W. K. Dierkes: "Silica filled rubber compounds" in Rubber Technologists Handbook, vol. 2, UK (2008)
- [19] A. Hunsche, U. Görl, H. G. Koban, and

- Th. Lehmann: Kautsch. Gummi Kunstst., Hürth 51, 525 (1998).
- [20] H.-D. Luginsland, Kautsch. Gummi Kunstst., 53, 10 (2000).
- [21] J. W. Brinke, P. J. Swaaij, L. A. E. M. Reuvekamp, and J. W. M. Noordermeer; Kautsch. Gummi Kunstst., 55, 244 (2002)
- [22] S. W. Wesseling Kautsch. Gummi Kunstst., 34, 280 (1981).
- [23] B. Vega, N. Agulló, M. Ventura, L. Comellas and S. Borrós : Determination of squalene by products during model compound vulcanization studies by LC ESI MS using silver nitrate as a post column reagent, AFINIDAD LXXI, 565, Enero - Marzo 2014.
- [24] L. Giansanti, S. Aleandri, B. Altieri, F. Caretti, G. Mancini, S. Morosetti, S. Ventura, Pérez Fernández and A. Gentili, Rapid Commun. Mass Spectrom. 2016, 30, 1339.
- [25] U. Giese, M. Hesse: systematic investigations on devulcanization of used rubber materials by means of model vulcanisation, ACS 184th technical meeting, Cleveland, USA (2013).
- [26] W. Dierkes, V. Rajan, J. W. M. Noordermeer, Rubber Chem. Technol., 78, 4 (2005).
- [27] O. Ito, Journal of the Society of Rubber Science and Technology, Japan, 61, 201 208 (1988).
- [28] D. Lenko, S. Schlögl, A. Temel, R. Schaller, A. Holzner, W. Kern, J. Appl. Polym. Sci., 129, 2735 (2013).
- [29] O. Shigeru, Journal of Synthetic Organic Chemistry, Japan, 26, 327 (1968).
- [30] P. Mandal, S. Ponnupandian, S. Choudhury, N. Singha, Rubber Chem. Technol., 90, 550 (2017).
- [31] C. E. Hoyle, T. Y. Lee, T. J. Roper, Polym. Sci. Part A: Polym. Chem., 42, 5301 5338 (2004)
- [32] M. Takebayashi, Journal of Synthetic Organic Chemistry, Japan, 20, 218-231 (1962).
- [33] S. C. Debnath, R. N. Datta J. W. M. Noordermeer, Rubber Chem. Technol., 76, 1311-1328 (2003).
- [34] W. Kaewsakul, K. Sahakaro, W. K. Dierkes and J. W. M. Noordermeer: Rubber Chem. Technol., 85, 277 294 (2012).

Dieses Klebeband nutzt das japanische Kirigami-Prinzip

KIRIGAMI-SCHNITTMUSTER

Ein Forschungsteam der Virginia Polytechnic Institute and State University (Virginia Tech) hat ein Klebeband entwickelt, das stark haftet, aber gezielt wieder entfernt werden kann. Die Inspiration stammt aus Kirigami, einer traditionellen japanischen Schneidekunst, bei der Papier gefaltet und geschnitten wird, um dreidimensionale Strukturen zu erzeugen. „Wir haben untersucht, wie wir Haftung gezielt steuern können, indem wir das Material strukturieren“, erklärt Michael Bartlett, Leiter des Forschungsteams. Dafür wurde ein schuppen- oder wabenartiges Muster aus rechteckigen U-Formen per Laser in das Klebeband geschnitten. Die Untersuchungen zeigen, dass das Band bei Zug in eine Richtung bis zu 60-mal



Durch das Schnittmuster ist das Klebeband sowohl stark haftend als auch leicht ablösbar.

stärker haftet als ohne Muster – gleichzeitig kann es in die entgegengesetzte Richtung leicht und rückstandslos entfernt werden. Ein klassisches Klebeband verliert seine Haftfestigkeit, wenn durch äußere Krafteinwirkung Risse im Haft-

klebstoff entstehen und sich ausbreiten. Beim Kirigami-Klebeband hingegen konzentrieren sich die Kräfte auf die schmalen Stege zwischen den geschnittenen U-Formen. „Das bewirkt eine Umkehr der Rissausbreitungsrichtung“, erklärt Bartlett. Dadurch steigt die Haftkraft bei Zug in eine Richtung drastisch an, während das Band in die andere Richtung leicht gelöst werden kann. Die Forscher überprüften die Wirksamkeit des Kirigami-Klebebands mit verschiedenen Experimenten. In einem Versuch wurden zwei Pakete – eines mit herkömmlichem Klebeband, eines mit Kirigami-Klebeband – verschlossen. Anschließend ließen sie einen Ziegelstein mehrfach auf die Kartons fallen. Das

Paket mit Standard-Klebeband brach beim zweiten Aufprall ein, während das mit Kirigami-Klebeband selbst nach fünf Versuchen noch intakt blieb. Auch verschiedene Klebebandtypen wurden untersucht. Das Muster zeigte bei allen Varianten eine signifikante Verstärkung der Haftkraft. „Das eröffnet vielseitige Anwendungsmöglichkeiten für industrielle und private Nutzung“, so Bartlett. Das Klebeband könnte in Verpackung, Logistik und industriellen Prozessen neue Möglichkeiten eröffnen. Pakete ließen sich sicherer verschließen und später leichter öffnen, ohne die Kartons zu beschädigen – ein Vorteil für nachhaltige Verpackungslösungen. In der Produktion könnten flexible Klebeverbindungen realisiert werden, die starken Halt bieten, aber bei Bedarf einfach gelöst werden können. „Unser Ziel ist es, Materialien intelligenter zu gestalten“, sagt Bartlett. „Durch strukturelle Anpassungen können wir Klebeverbindungen gezielt steuern – und das kann viele Branchen verändern.“ ■

KONTAKT

Industrieverband Klebstoffe e.V.,
Düsseldorf
www.klebstoffe.com



Forscher haben ein Schnittmuster für Klebebänder entwickelt, welches sich ein besonderes Prinzip zu eigen macht.

**Silikonschaum-Elastomere · Profile ·
Schaummorphologie · Viskosität**

Festsilikonkautschuke können mit unterschiedlichen chemischen und physikalischen Treibmitteln geschäumt werden. Aufgrund der toxischen und damit gesundheitsschädlichen Wirkung von chemischen Treibmitteln gewinnen jedoch physikalische Treibmittel zunehmend an Bedeutung. Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Einfluss der Viskosität, eingestellt über den Kieselsäuregehalt, von unterschiedlichen Festsilikonkautschuken auf die Schaummorphologie von mit Wasser geschäumten extrudierten Profilen untersucht. Hierbei zeigte sich, dass es mit steigender Viskosität zu einer Abnahme der Porengröße bei einer gleichzeitigen Zunahme der Porendichte kam, was sich ebenfalls in einer Erhöhung der Dichte widerspiegelte. Bei der gemessenen Härte konnte ebenfalls beobachtet werden, dass es mit sinkender Porengröße und Erhöhung der Porendichte zu einem Anstieg der Härte kam.

**Influence of Material Viscosity
on extruded solid Silicone
Rubber Foam Profiles****Silicone foam elastomers · profiles ·
foam morphology · viscosity**

High consistency silicone rubbers can be foamed with various chemical and physical blowing agents. However, due to the toxic and therewith harmful effects of chemical blowing agents, physical blowing agents are becoming increasingly important. In this thesis, the influence of the viscosity adjusted via the silica content of different solid silicone rubbers on the foam morphology of water-foamed extruded profiles was investigated. It was found that increasing viscosity led to a decrease in pore size and an increase in pore density, which was also reflected in an increase in density. With regard to the measured hardness, it was also observed that the hardness increased as the pore size decreased and the pore density increased.

Figures and Tables: By a kind approval of the authors.

Einfluss der Materialviskosität auf extrudierte Festsilikonkaut- schukschaumprofile

Einleitung

Silikonelastomere bieten aufgrund ihrer Struktur interessante Eigenschaften, was zu hoher Elastizität, Flexibilität bei niedrigen sowie hohen Temperaturen, hoher Gasdurchlässigkeit, ausgezeichneten dielektrischen Eigenschaften und Biokompatibilität führt. Jedoch ist der größte Nachteil von Silikonelastomeren im Vergleich zu anderen Polymeren der hohe Kostenfaktor bei der Verwendung in der Industrie [1].

Aufgrund der zuvor beschriebenen Eigenschaften wird Silikonkautschuk häufig im Automobil-, Medizin-, Haushalts- und Energiesektor eingesetzt. In diesen Bereichen ist die Verwendung von geschäumten Silikonteilen möglich, was sich bei den Bauteilen dadurch äußert, dass diese weicher, billiger und leichter werden [2].

Silikonkautschuke werden in der Regel durch Formpressen, Spritzgießen oder Extrusion verarbeitet. Im Bereich der Festsilikonkautschuke (HCR) ist das weitverbreiteste Verarbeitungsverfahren das Extrusionsverfahren [3]. Hierbei werden regulär Peroxide wie Di-(4-Methylbenzoyl)-Peroxide (DMP) oder Di-(2,4-Dichlorbenzoyl)-peroxide (DCIBP) für die Vernetzung des Extrudats verwendet (siehe Abbildung 1), welche ohne äußeren Druck vulkanisieren [4]. Durch die Entstehung von gesundheitsschädlichen polychlorierten Biphenylen (PCB) bei der Vulkanisation von DCIBP werden jedoch zunehmend chlorfreie Peroxide eingesetzt [5].

Für das Schäumen von Kautschuken wird zwischen organischen und anorganischen physikalischen oder chemischen Treibmitteln unterschieden. Bei den physikalischen Treibmitteln sind hierbei die bekanntesten Vertreter Stickstoff und Wasser (anorganisch), sowie Pentan und Hexan (organisch). Häufiger verwendet werden jedoch chemische Treibmittel, welche ebenfalls in organische und anorganische unterschieden werden. Anorganische Treibmittel, welche beispielsweise auf Ammonium-, Natrium- und Kaliumcarbonaten basieren, bilden unter Wärmezufuhr CO_2 und Wasser. Bei dieser

oftmals endothermen Reaktion entsteht eine offenzellige, grobe Schaumstruktur. Organische Treibmittel wie exemplarisch Azodicarbonamid, p-Toluolsulfonylsemicarbazid (TSSC), 5-Phenyltetrazol (5-PT), OBSH hingegen reagieren hauptsächlich exotherm und bilden hierbei ein Gasgemisch aus N_2 , CO_2 , Kohlenmonoxid (CO), Ammoniak und Wasser. Eine Übersicht über organische chemische Treibmittel und die entstehenden Gase ist in Abbildung 2 dargestellt [6].

Im Bereich der Silikonkautschuke können, wie zuvor beschrieben, beide Arten von Treibmitteln eingesetzt werden. Als chemische Treibmittel werden nach dem heutigen Stand der Technik meist Chemikalien wie AJBN (Azobisisobutyronitril) oder Carbonate wie Azodicarbonamid (ADCA) verwendet. Diese sind oft gesundheitsschädlich, und Neben- und Abbauprodukte aus der Reaktion verbleiben im Schaum [7]. Das Problem dabei ist, dass bei der Verwendung chemischer Treibmittel wie Azodicarbonamid (ADCA) Kohlenmonoxid und Stickstoff sowie Hydrazodicarbonamid und Cyansäure bei der Zersetzungsreaktion durch Wärmezufuhr entstehen [8]. Diese Produkte sind allerdings problematisch bei der Verwendung von additionsvernetzenden Systemen, da diese anfällig für Katalysatorgifte wie Schwefel- und Stickstoffverbindungen sind [9]. Alternativ können

Autoren:

**Timo Hofmann, Ralf-Urs Giesen,
Hans-Peter Heim, Kassel Deutschland**

Korrespondenzautor:
Timo Hofmann
Institut für Werkstofftechnik
34125 Kassel, Deutschland
E-Mail: t.hofmann@uni-kassel.de

jedoch auch physikalische Treibmittel wie thermoplastische Mikrosphären [2], Wasser [10,11] oder Stickstoff und Kohlenstoffdioxid [7] verwendet werden. Beim Aufschäumen der Silikonkautschuke besitzt hierbei der Kieselsäuregehalt einen großen Einfluss auf die entstehenden Zellmorphologie und die daraus resultierenden Eigenschaften. Bei Versuchen mit chemischen Treibmitteln zeigte sich, dass mit zunehmenden Kieselsäuregehalt die Dichtereduktion reduziert wird [12]. Auch im Bereich der physikalischen Treibmittel gab es ähnliche Ergebnisse mit Festsilikonkautschuken mit unterschiedlichen Viskositäten. Mit zunehmender Viskosität kommt es laut Sitz zu einer Abnahme des Zelldurchmessers und einer Zunahme der Zelldichte [7].

Versuchsdurchführung

Die verwendeten Festsilikonkautschuke von der Wacker Chemie AG waren die in Tabelle 1 dargestellten Festsilikonkautschuktypen, welche zusammen mit den Vernetzern PMB (di-(4-methylbenzoyl)peroxid) von Pergan und Di-(2,4-Dichlorbenzoyl)-peroxid (DCIBP) von United Initiators, sowie einem Wasser/Kieselsäuregemisch (2:1) als Treibmittel compoundiert wurden. Als Kieselsäure wurde hierbei die pyrogene Kieselsäure Aerosil 200 von Evonik verwendet. Für die Compoundierung wurde hierbei ein Innenmischer CTM-25 von Colmec SPA verwendet, welche alle Komponenten für 30 min miteinander vermischte. Im Anschluss erfolgte die Extrusion mit Hilfe des EEK 32.12 S-4/90 SIR Silikon Extruders von Rubicon Gummitechnik mit einem 2x40 mm Streifenwerkzeug. Die Vernetzung wurde hierbei durch einen Infrarottunnel durchgeführt, wel-

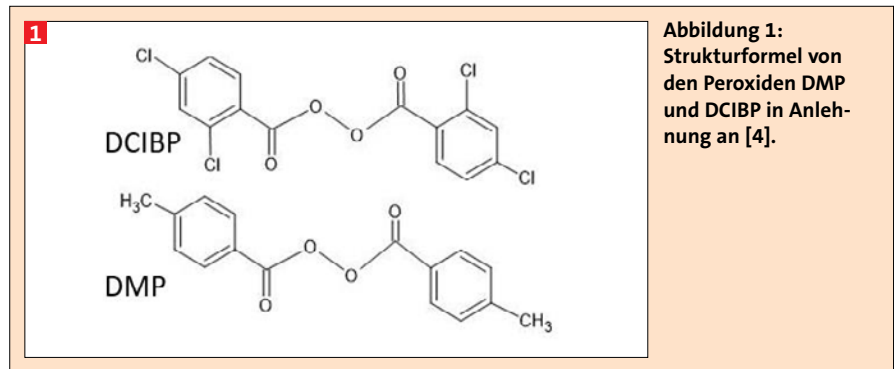


Abbildung 1: Strukturformel von den Peroxiden DMP und DCIBP in Anlehnung an [4].

1 Tabelle 1.

Festsilikonkautschuk	Vernetzer	Treibmittel
Wacker Elastosil R 401-40 S	1,5 phr PMB	2 phr Wasser/Kieselsäure
Wacker Elastosil R 401-40 S	1,5 phr DCIBP	2 phr Wasser/Kieselsäure
Wacker Elastosil R 401-60 S	1,5 phr PMB	2 phr Wasser/Kieselsäure
Wacker Elastosil R 401-60 S	1,5 phr DCIBP	2 phr Wasser/Kieselsäure
Wacker Elastosil R 401-80 S	1,5 phr PMB	2 phr Wasser/Kieselsäure
Wacker Elastosil R 401-80 S	1,5 phr DCIBP	2 phr Wasser/Kieselsäure

cher so eingestellt wurde, dass das geschäumte Extrudat am Tunnelausgang eine Temperatur von $180 \pm 5^\circ\text{C}$ aufwies. Bei der Materialcharakterisierung wurde zunächst das Rohmaterial mit Hilfe eines Hochdruckkapillarrheometers RG25 von Göttfert Werkstoff-Prüfmaschinen gemessen, um die Viskosität des Ausgangsmaterials zu ermitteln. Im Anschluss erfolgte nach dem Compoundieren die Ermittlung des Vernetzungsverhaltens mit einem Rubber Process Analyzer von Montech Werkstoffprüfmaschinen, wobei hier Compounds mit und ohne Treibmittel miteinander verglichen wurden, um einen möglichen Einfluss des Treibmittels auf die Vernetzungsreaktion zu detektieren. Nach der Herstellung der

Extrudate wurden aus den Profilen Probekörper ausgestanzt, mit Hilfe deren die Dichte (nach dem archimedischen Prinzip) und Shore A Härte (Bareiss digitest) bestimmt wurden. Weiterhin erfolgte die Betrachtung der Schaumstruktur über den Querschnitt der Zugstäbe durch ein Rasterelektronenmikroskop, um u. a. die Porengröße und Porendichte zu beurteilen.

Ergebnisse und Diskussion

Die Analyse des Basiskautschuks zeigt zunächst in der TGA (Abbildung 3), dass mit steigender Ausgangshärte der Kieselsäuregehalt der verwendeten Kautschuke ansteigt. Dieser Anstieg begründet auch die höhere Viskosität des Elas-

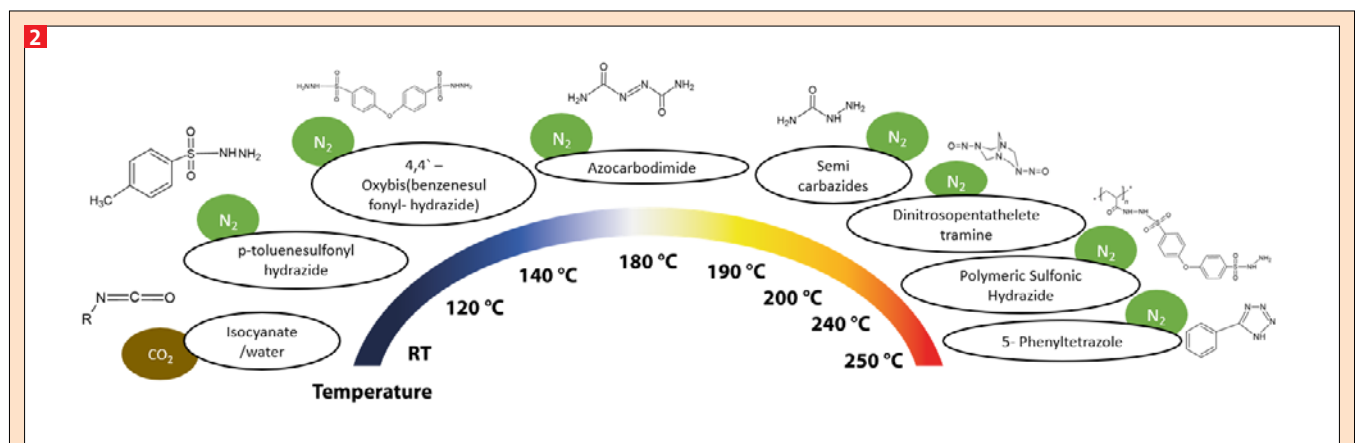


Abbildung 2: Darstellung von organischen chemischen Treibmitteln und das entstehende Treibgas in Abhängigkeit der Temperatur in Anlehnung an [6].

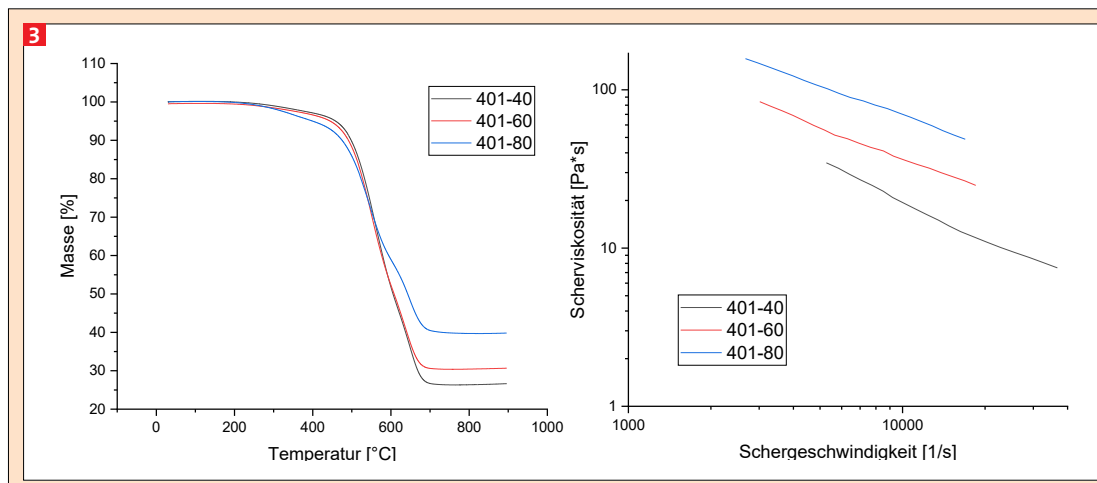


Abbildung 3:
Links) Ergebnisse der
TGA-Analyse; rechts)
Viskosität der unter-
schiedlichen Festsili-
konkautschuke.

tosil 401-60 und Elastosil 401-80 gegen-
über dem Elastosil 401-40, wie in
Abbildung 3 rechts dargestellt. Die Ur-
sache hierfür liegt wie in Abbildung 3 links
dargestellt in den unterschiedlichen Füll-
stoffgehalten, welche mit Hilfe der TGA
Analyse bestimmt wurden. Konkret

kommt es hierbei zu einem Anstieg von
ca. 26% Kieselsäuregehalt auf circa 40%.
Die Untersuchung des Einflusses der
Vernetzung zeigt, dass das maximale
Drehmoment durch die Zugabe des
Treibmittels abgesenkt wird, wie exem-
plarisch in Abbildung 4 dargestellt. Hier-

bei war der Einfluss bei dem Vernetzer
DCLBP (0,14 dNm Absenkung) im Ver-
gleich zu PMB (0,4 dNm Absenkung) ge-
ringer, wobei es mit steigendem Füll-
stoffgehalt zu einer Zunahme des Dreh-
momentsabfalls kommt. Eine Erklärung
hierfür liefern die Erkenntnisse von Pe-
churai et al. in anderen Kautschuken
[13]. Durch die Entstehung von Mikroka-
vitäten durch das Treibmittel kommt es
zu einer Absenkung des elastischen
Drehmoments. Die Zunahme des Dreh-
momentabfalls mit steigendem Füll-
stoffgehalt wurde hingegen bisher noch
nicht untersucht. Eine mögliche Ursache
hierfür könnte sein, dass das Wasser
durch die höhere Viskosität an der Diffu-
sion aus dem Material gehemmt wird,
was zu einer höheren Bildung von Kavi-
täten im Prüfkörper führt. Weiterhin
wird deutlich, dass die verwendeten Ver-
netzer unterschiedliche Starttemperatu-
ren haben, was sich durch die unter-
schiedlich schnelle Vernetzungsges-
chwindigkeit am Beginn der Vulkanisa-
tionskurve erkennen lässt.

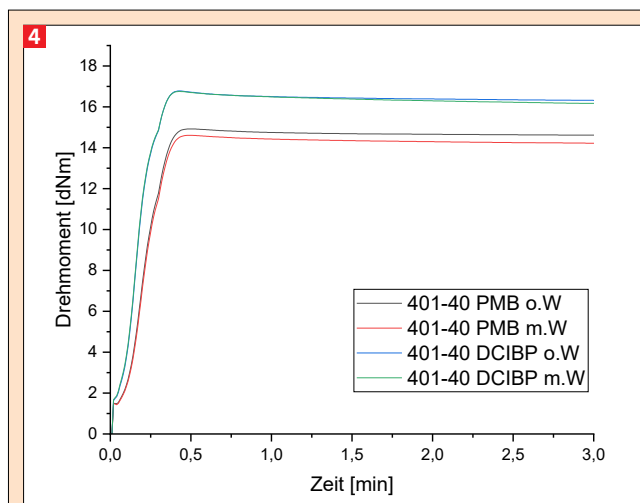


Abbildung 4:
RPA-Messkurven für
das Material 401-40
mit PMB und DCIBP
Vernetzer mit und ohne
Treibmittel.

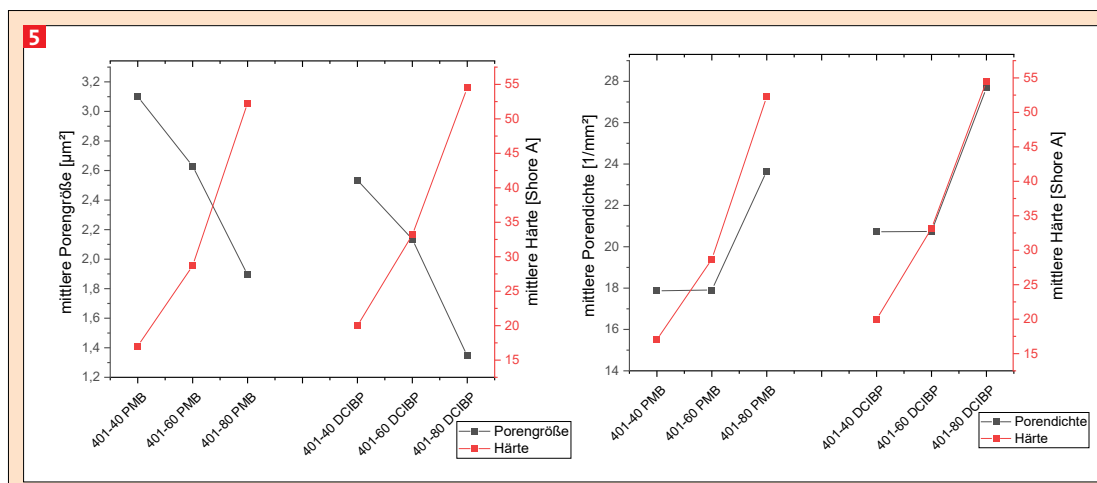


Abbildung 5:
Darstellung des Ver-
laufs der Porengröße
und Porendichte im
Bezug auf die entstan-
dene Shore A Härte
bei unterschiedlichen
Vernetzern und Basis-
materialien.

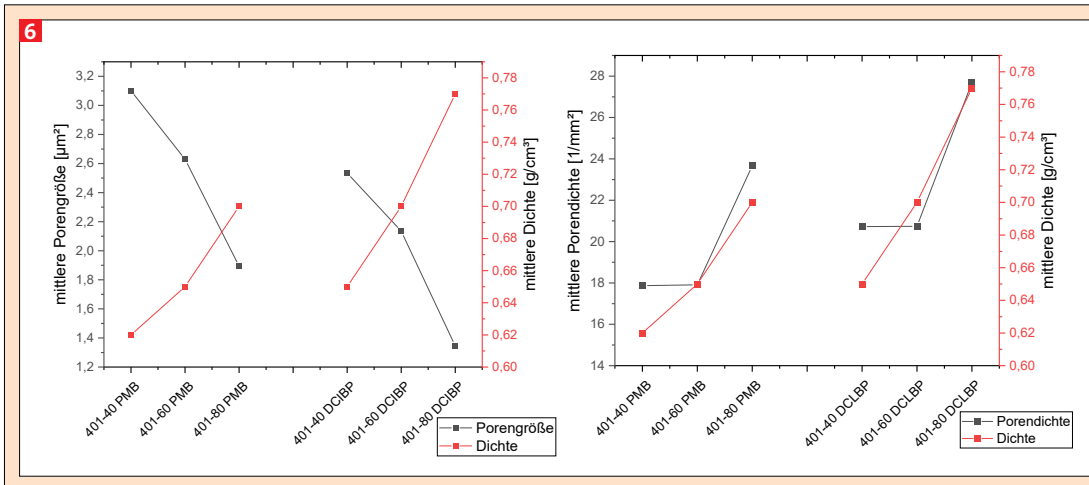


Abbildung 6: Darstellung des Verlaufs der Porengröße und Porendichte im Bezug auf die entstandene Dichte bei unterschiedlichen Vernetzern und Basismaterialien.

Wie in Abbildung 5 dargestellt, wird zum einen deutlich, dass die mittlere Porengröße unabhängig vom verwendeten Vernetzer PMB oder DCIBP mit steigender Viskosität des Basiskautschuks abnimmt, es jedoch gleichzeitig zu einem Anstieg der Porendichte kommt. Die Erhöhung der Porendichte wird hierbei jedoch erst beim Sprung von dem Material 401-60 zu 401-80 deutlich. Zu ähnlichen Ergebnissen kam bereits Sitz bei der Verwendung der physikalischen Treibmittel Stickstoff und Kohlenstoffdioxid [7]. Hinsichtlich der Härte wird gerade bei Betrachtung des Vernetzers DCIBP deutlich, dass die Porengröße einen großen Einfluss auf die resultierende Shore A Härte besitzt. Es kommt in Abhängigkeit des Füllstoffgehaltes und der Porengröße zu einem Anstieg von circa 20 auf 54,5 Shore A. Deutlich erkennbar ist aber auch, dass es mit steigender Porendichte zu einem Anstieg der Härte kommt, wobei hierbei berücksichtigt werden muss, dass es zeitgleich zu einer Verkleinerung der Poren kommt.

Hinsichtlich der Dichte wurde in den Untersuchungen deutlich, dass bei dem Vernetzer PMB größere Poren durch den späteren Vernetzungsstart entstehen. Im Vergleich zu DCIBP kommt es hierdurch zu einer geringeren Dichte (0,62 für PMB vs. 0,65 g/cm³ DCIBP), wie in Abbildung 6 dargestellt. Die Zunahme der Dichte mit steigendem Füllstoff beziehungsweise Kieselsäuregehalt bestätigt die Ergebnisse, wie sie von Liu im Bereich der chemischen Treibmittel mit Silikonkautschuken untersucht wurden [12]. Auffällig ist auch, dass die Porendichte zwar mit steigender Viskosität ansteigt, jedoch die Porengröße offensichtlich den höheren Einfluss auf die Dichte besitzt, wie am Vergleich der Werte von 401-40 und

401-60, wo eine mittlere Porendichte von ca. 21 Poren/mm² DCIBP oder circa 18 Poren/mm² PMB ermittelt wurde, zu sehen ist.

Zusammenfassung & Ausblick

Im Rahmen dieser Untersuchung wurde der Einfluss des Füllstoffgehaltes von Festsilikonkautschuken mit zwei unterschiedlichen Vernetzern an mit Wasser geschäumten Festsilikonelastomerextrudaten untersucht. Hierbei wurde es mit Hilfe des Rubber Process Analysers ersichtlich, dass es eine Beeinflussung des Wassers auf die gemessene Vernetzungsreaktion gibt, welche künftig genauer, beispielsweise durch Quellversuche zur Bestimmung der Vernetzungsdichte untersucht werden muss. Weiterhin wurde deutlich, dass mit steigendem Füllstoff- beziehungsweise Kieselsäuregehalt die Viskosität der Kautschukmischung ansteigt. An Hand der Extrudateigenschaften konnte abgeleitet werden, dass die langsamere Vernetzung des PMB gegenüber dem DCIBP zu größeren Poren unabhängig vom Kieselsäuregehalt des Kautschuks führt. Deutlich erkennbar war zudem, dass unabhängig vom verwendeten Vernetzer mit steigendem Kieselsäuregehalt die Porengröße geringer wurde und es zu einer Erhöhung der Porendichte kam. Bei der Dichte war deutlich auffallend, dass es einen Zusammenhang zwischen der Dichte und Porengröße gab. Große Porengrößen führten unabhängig vom Vernetzer zu geringeren Dichten. In Hinsicht auf die resultierende Shore A Härte wurde deutlich, dass mit steigender Porendichte und sinkender Porengröße es zu einem Anstieg kam. Basierend auf diesen Untersuchungen wird zukünftig der Einfluss der Viskosität an additionsvernetzenden Sys-

temen genauer betrachtet. Da hierbei von anderen Treibmitteln wie Stickstoff oder Kohlenstoffdioxid bekannt ist [7], dass es zu großen Poren kommt, kann es zudem nötig werden, den Einsatz von Emulgatoren oder Nukleierungsmitteln zur Verfeinerung der Schaumstruktur zu untersuchen. ■

Danksagung

Vielen Dank an Wacker Chemie für die Bereitstellung der Materialien.

REFERENCES

- [1] T. Métivier, P. Cassagnau, New trends in cellular silicone: Innovations and applications. *Journal of Cellular Plastics*, 2019, Vol. 55, No.2, p.151, DOI: 10.1177/0021955X18806845.
- [2] S. Marl, R.-U. Giesen, H.-P. Heim, Liquid Silicone Rubber Foamed with Thermoplastic Expandable Microspheres. *Materials (Basel, Switzerland)*, 2022, Vol. 15, No.11, DOI: 10.3390/ma15113779.
- [3] F. Verheyen, R.-U. Giesen, H.-P. Heim, The Influence of Different Geometries on the Extrusion Process of High-Consistency Silicone Rubber, in *SPE ANTEC 2019: Detroit, Michigan, USA, 18-21 March 2019*, Curran Associates Inc, Red Hook, NY 2019.
- [4] F. Verheyen, R.-U. Giesen, H.-P. Heim, Influence of different types and amounts of crosslinking agent on the curing process of silicone rubber. *Kunststofftechnik*, 2017, Vol. 4, p.233, DOI: 10.3139/O999.02042017.
- [5] Chlorfreie Silikonmischungen vermeiden PCB-Freisetzung. <https://www.k-zeitung.de/chlorfreie-silikonmischungen-vermeiden-pcb-freisetzung>. Accessed 9 January 2025.
- [6] E. Rostami-Tapeh-Esmaeil, A. Vahidifar, E. Esmizadeh, D. Rodrigue, *Chemistry, Proces-*

- sing, Properties, and Applications of Rubber Foams. *Polymers*, 2021, Vol. 13, No.10, p.1565, DOI: 10.3390/polym13101565.
- [7] S. Sitz, Extrusion von physikalisch geschäumten Profilen aus Silikonkautschuk, Ph. D. thesis, Aachen 2015.
- [8] S. Salg, M. Malow, H. Michael-Schulz, K. D. Wehrstedt, R. Schomäcker, Die Deflagration von Azodicarbonamid unter verschiedenen Umgebungsbedingungen, in 14. Kolloquium zur chemischen und physikalischen Sicherheitstechnik, p. 118, DOI: 10.13140/RG.2.1.3601.5606.
- [9] F. Verheyen, Die Extrusion von Festsilikonkautschuk - eine Verfahrensanalyse, Ph. D. thesis, Kassel 2019.
- [10] S. Marl, M. Hartung, K. Klier, A. Rüppel, R.-U. Giesen, H.-P. Heim, Improvement of the Cell Structure of Water-Foamed Liquid Silicone Rubber. *Adv Eng Mater*, 2023, DOI: 10.1002/adem.202201898.
- [11] S. Marl, A. Rüppel, M. Hartung, K. Klier, R.-U. Giesen, H.-P. Heim, Liquid Silicone Rubber Foams Made with Water as Blowing Agent. *Adv Eng Mater*, 2022, Vol. 24, No.1, p.2100382, DOI: 10.1002/adem.202100382.
- [12] P. Liu, D. Liu, H. Zou, P. Fan, W. Xu, Structure and properties of closed-cell foam prepared from irradiation crosslinked silicone rubber. *J. Appl. Polym. Sci.*, 2009, Vol. 113, No.6, p.3590, DOI: 10.1002/app.30341.
- [13] W. Pechurai, T. Muansupan, P. Seawlee, Effect of Foaming Temperature and Blowing Agent Content on Cure Characteristics, Mechanical and Morphological Properties of Natural Rubber Foams. *AMR*, 2013, Vol. 844, p.454, DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.844.454.

KIT erforscht chemisches Kunststoffrecycling im Pilotmaßstab

WERTSTOFFE AUS KUNSTSTOFFABFÄLLEN

Steigende Energiekosten, knappe Rohstoffe und wachsende Abfallmengen machen Recycling zu einer zentralen Herausforderung der Industrie. Das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) hat mit dem Carbon Cycle Lab (CC Lab) eine Forschungsplattform geschaffen, die sich der effizienten Wiederverwertung von Kunststoffabfällen widmet. Dabei liegt der Fokus auf chemischem Recycling, das Kunststoffe in ihre chemischen Grundbausteine zerlegt und eine Wiederverwertung ermöglicht, die über das mechanische Recycling hinausgeht. Die Kunststoffproduktion ist in den letzten Jahrzehnten stark gestiegen und lag 2023 bei etwa 414 Mio. t weltweit. Dennoch beträgt die Recyclingquote nur etwa 10%. Das CC Lab soll dazu beitragen, diese Quote zu erhöhen und bisher nicht recycelbare Abfälle in den Stoffkreislauf zurückzuführen. Das Carbon Cycle Lab basiert auf Erkenntnissen des Bioliq-Projekts, bei dem das KIT bereits einen Verwertungsprozess für biogene Reststoffe entwickelt hat. In einer Pilotanlage wurde gezeigt, dass aus Stroh Benzin hergestellt werden kann. Dieses Wissen wird nun auf das chemische Recycling von Kunststoffabfällen übertragen. Laut Pro-



Bilder: Markus Breig, KIT

Mit Cycle Lab wird unter anderem das chemische Recycling von Kunststoffabfällen erforscht und in den Pilotmaßstab überführt.

fessor Frederik Scheiff vom Engler-Bunte-Institut des KIT gelang es erstmals, Kunststofföle in chemische Rohstoffe umzuwandeln – ein wichtiger Schritt zur industriellen Nutzung dieser Verfahren. Durch chemische Prozesse werden Schadstoffe entfernt und Kunststoffabfälle in neue Ausgangsstoffe für die Produktion von Kunststoffen überführt. Die europäische Gesetzgebung fordert höhere Recyclingquoten: Bis 2035 sollen jährlich zehn Millionen Tonnen Kunststoff zusätzlich recycelt werden. Für Deutschland bedeutet das eine Erhöhung um 2 bis 3 Mio. Jahrestonnen. Chemisches Recycling könnte hier eine Schlüsselrolle spielen, da es Materialien wiederverwertet,

die bislang verbrannt oder deponiert werden mussten. „Wir müssen Kunststoffabfälle als wertvolle Rohstoffquelle betrachten“, betont Professor Dieter Stapf, Leiter des Instituts für Technische Chemie am KIT. Das schone die Umwelt, reduziere

Abhängigkeiten von fossilen Rohstoffen und könne langfristig kosteneffizienter sein. Das CC Lab ist eine interdisziplinäre Forschungsplattform am KIT, an der mehrere Institute beteiligt sind:

- Institut für Technische Chemie
 - Institut für Katalyseforschung und Technologie
 - Engler-Bunte-Institut
- Zudem arbeitet das KIT mit Industriepartnern zusammen, um die entwickelten Technologien in den industriellen Maßstab zu überführen. Die Plattform wird vom Bund als Teil der Helmholtz-Gemeinschaft gefördert. ■

KONTAKT

KIT Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe
www.kit.edu/index.php



Das Carbon Cycle Lab umfasst auch Technologien der früheren Bioliq-Anlage zur Verarbeitung biogener Reststoffe und nachwachsender Rohstoffe.

Annealing temperatures · Shore hardness number · compressive properties and polymethylmethacrylate (PMMA)

The aim of this study was to discuss the influence of annealing temperatures on the Shore hardness number and compressive properties in elastic deformation zone of polymethylmethacrylate (PMMA). Annealing process of PMMA was carried out at temperatures below and above its glass-transition temperature. Compressive test and surface hardness measurements were carried out. The results showed that by applying annealing heat-treating, the Shore hardness number improved at all used temperatures. The compressive results showed that at lower annealing temperatures from 80 °C to 100 °C, the compressive properties such as yield strength, malleability, and modulus of resilience had the highest values. The best combination of strength and malleability results occurred at lower annealing temperatures from 80 °C to 100 °C.

Mechanische Eigenschaften von PMMA in Abhängigkeit von Temper-Temperaturen**Temper-Temperaturen · Shore-Härte · Kompressionseigenschaften · Polymethylmethacrylat (PMMA)**

Ziel dieser Studie war es, den Einfluss der Temper-Temperaturen auf die Shore-Härte und die Kompressionseigenschaften in dem elastischen Deformationsbereich von Polymethylmethacrylat (PMMA) zu untersuchen. Der Temperprozess von PMMA wurde bei Temperaturen unter- und oberhalb der Glasübergangstemperatur durchgeführt. Es erfolgten Kompressionstests und Messungen der Oberflächenhärte. Die Ergebnisse zeigen, dass sich durch Tempern die Shore-Härte bei allen verwendeten Temperaturen verbesserte. Die Kompressionsergebnisse zeigen, dass bei niedrigeren Temper-Temperaturen von 80 bis 100 °C die Kompressionseigenschaften wie Streckgrenze, Formbarkeit und Elastizitätsmodul die höchsten Werte aufwiesen. Die beste Kombination aus Festigkeit und Formbarkeit wurde bei niedrigeren Temper-Temperaturen von 80 bis 100 °C erreicht.

Figures and Tables: By a kind approval of the authors.

Mechanical Properties of Polymethylmethacrylate as a Function of Annealing Temperatures

1. Introduction

Polymethylmethacrylate (PMMA) is a thermoplastic polymer [1] and one of the most widely used industrial polymeric materials [2]. It is an acrylic and amorphous polymer commonly used in dental and medical applications. The glass-transition temperature of PMMA is 105 °C [3]. PMMA has been widely used in many medical devices, including blood pumps and dialyzers. It is an ideal candidate material for implantable ocular lenses and hard contact lenses by its optical properties [1,4]. In dentistry, PMMA is considered one of the most common materials for denture applications because of its outstanding properties [5,6]. The advantages of PMMA are: low cost, light weight, satisfactory aesthetics, color matching ability, easy to do finishing and polishing processes [7,8], easy to form, and good surface [9]. Therefore, it is widely used in various practical applications in different fields. Polymethylmethacrylate has some disadvantages regarding its mechanical properties such as insufficient mechanical strength, hardness and wear resistance. Thus, PMMA should be enhanced to achieve suitable mechanical properties [5]. The mechanical properties of polymeric materials depend on the process parameters and the chemical composition of the polymer used. Mechanical properties are very important in product applicability. One of the methods of improving the mechanical properties of polymeric materials is heat-treating [10].

Heat-treating of polymeric materials is broadly used to modify the mechanical properties and widening their applications [1,11-13]. This improving in the mechanical properties is a result of the increase in the crystal phase in the structure of polymer [12,13]. Heat-treating to alter the mechanical properties of polymeric materials is a process consists of three-step: 1) heating the polymer to a certain temperature; 2) holding the temperature for a definite time; and 3) cooling the polymer to room temperature. Annealing of polymeric materials is a heating of a polymeric material to below

its glass-transition temperature (T_g) in order to relieve the internal stresses introduced during its fabrication. The annealing process depends on time and temperature [14].

Present study was concerned with the influence of annealing temperatures on the Shore hardness number and compressive properties (modulus of elasticity, yield strength, malleability at yielding, and modulus of resilience) of PMMA.

2. Materials and methods

2.1. Material

In this study polymethylmethacrylate (PMMA) with the trade name "perspex" was used. PMMA was received in form of a sheet with a thickness of 10 mm. Table 1 shows the mechanical properties of the as-received PMMA.

2.2. Heat-treating

The type of heat-treating employed in this study was namely annealing heat-treating. Heat-treating specimens of 20 mm long and 10 mm x 10 mm in cross-section were positioned in an electrical oven. Annealing of polymethylmethacrylate was carried out at temperatures below its glass-transition temperature.

Authors:

A. A. Meshref, A. M. Shawky,
Minia, Egypt

Corresponding Author:

Prof. A. A. Meshref
Department of Production Engineering
and Mechanical Design
Faculty of Engineering,
Minia University, Egypt
E-Mail: alaa.moshref@mu.edu.eg

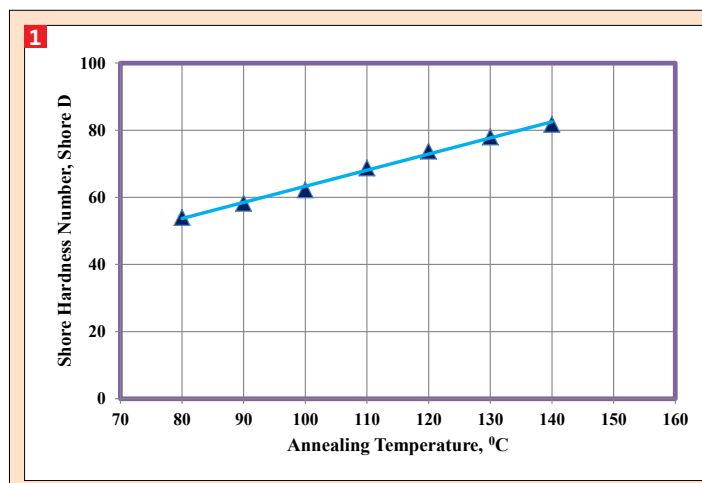


Figure 1: Dependence of Shore hardness number on the annealing temperatures for the polymethylmethacrylate (PMMA).

thacrylate (PMMA). It shows that the Shore hardness number depended strongly on the annealing temperatures from 80 °C to 140 °C. The Shore hardness number of the PMMA improved from 54 to 81.75 Shore D with increasing the annealing temperatures from 80 °C to 140 °C. This improvement (28.5 Shore D) is about 53.52% compared to PMMA before heat-treating (53.25 Shore D). The increase in Shore hardness number may be due to the increase in the smoothness of the surface after heat-treating. Eduardo et al [1] reported that the surface of specimens obtained after heat-treating was smoother in comparison to the one obtained before heat-treating. The higher Shore hardness number was attributed to PMMA heat-treated at annealing temperature of 140 °C. In other words, the annealed PMMA at 140 °C showed the higher resistance to plastic deformation.

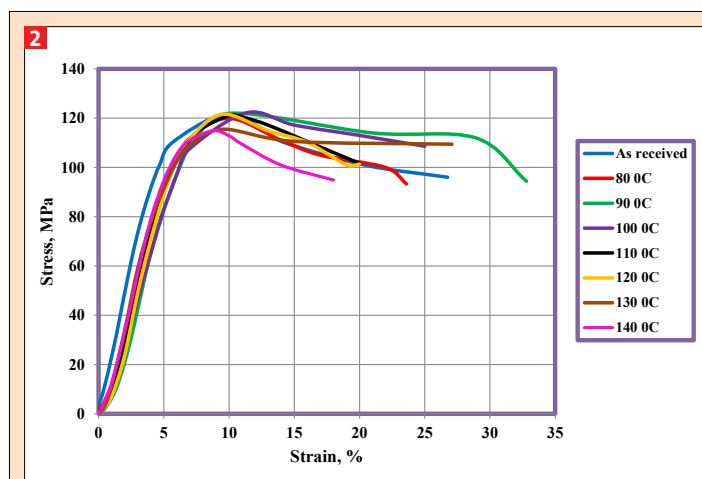


Figure 2: Engineering stress-strain curves for the polymethylmethacrylate (PMMA) specimens.

3.2 Compression test results

Compression test was used to provide information about the as-received PMMA and PMMA heat-treated at seven different annealing temperatures of 80, 90, 100, 110, 120, 130, 140 °C. Figure 2 shows the engineering stress/strain curves for the as-received PMMA and PMMA heat-treated at seven different annealing temperatures. As shown from the curves, there is bending in the stress/strain curves under the compressive loads. This is due to the compressive specimens do not fail entirely by crushing, but by buckling. This happens in the case of long specimens [15]. The buckling mode is one of the modes of deformation that can occur in compression testing [16].

Compressive properties in elastic deformation zone were determined for each specimen from engineering stress-strain curve. The compressive properties in elastic deformation zone include modulus of elasticity, yield strength (proportionality limit), malleability at yielding, and modulus of resilience.

The modulus of elasticity versus seven different annealing temperatures for the polymethylmethacrylate (PMMA) is shown in Figure 3. These results denoted that the modulus of elasticity appeared to depend on the annealing temperatu-

ture (80, 90, 100 °C) and above its glass-transition temperature (110, 120, 130 and 140 °C) for two hours followed by furnace cooling.

2.3. Hardness test

Specimens of 20 mm long and 10 mm x 10 mm in cross-section were used to measure the surface hardness number of the PMMA. The test was performed using Shore D durometer instrument with dial value (1–100 degree), pointer journey (0–2.5 mm), and the stress at the end of pointer range from 0 to 44.5 N. Hardness was measured on the top and bottom surfaces of the specimens at room temperature. For each specimen, the hardness value was measured four times on the top and bottom surfaces, and then the average value was calculated.

2.4. Compression test

For compression test, specimens of 20 mm long and 10 mm x 10 mm in cross-section were used to measure the compressive properties in elastic deformation zone (modulus of elasticity, yield strength (proportionality limit), malleability at yielding, and modulus of resilience) of the PMMA. The compression test was performed at room temperature using universal testing machine at a cross-head speed of 3 mm/min.

3. Results and Discussion

3.1 Hardness test results

Figure 1 illustrates the effect of increasing annealing temperatures on Shore hardness number of the polymethylme-

Table 1: The mechanical properties of the as-received PMMA

Shore hardness number [Shore D]	Modulus of elasticity [GPa]	Compressive yield strength [MPa]	Malleability at yielding [%]	Modulus of resilience [MJ/m ³]
53.25	2.4	83.2	3.49	1.45

res. Modulus of elasticity first decreased and then increased when annealing temperatures increased from 80 °C to 140 °C. This behavior can be explained by the increase in the elastic strain up to 90 °C. Above 90 °C, the decrease in the elastic strain lead to increase the modulus of elasticity ($E = \text{stress/strain}$, depends on the strain value within the elastic region). As Figure 3 indicates, the PMMA annealed at 140 °C exhibited the highest modulus of elasticity, while the PMMA annealed at 90 °C exhibited the lowest modulus of elasticity. In other words, the PMMA annealed at 140 °C had the highest withstand to elastic deformation under the compressive forces, while the PMMA annealed at 90 °C had the lowest withstand to elastic deformation under the compressive forces.

The effect of annealing temperatures on the compressive yield strength (proportionality limit) for the polymethylmethacrylate (PMMA) is indicated in Figure 4. These data illustrated that compressive yield strength first increased from 100 MPa to 107 MPa when the annealing temperatures increased from 80 °C to 90 °C and then decreased from 107 MPa to 87.44 MPa when annealing temperatures increased from 90 °C to 130 °C. The reason for the increase in the compressive yield strength after 80 °C may be due to the hard glassy structure below the glass-transition temperature (T_g). The drop in the compressive yield strength above 90 °C may be attributable to the soft leathery structure above the glass-transition temperature (T_g). Figure 4 reveals that the PMMA annealed at 90 °C led to a significant improvement over the as-received PMMA in the compressive yield strength. This improvement is about 28.6% with a value of 23.8 MPa. The resistance of a material to plastic deformation is related to the yield strength, that is, the higher the yield strength, the stronger the material. This means that the PMMA can be heat-treated by annealing at 90 °C to produce higher resistance to plastic deformation. Malleability is the ability of a material to deform under compressive forces without rupture. Figure 5 indicates the dependence of the malleability at yielding on the annealing temperatures for the polymethylmethacrylate (PMMA). As Figure 5 indicates, the maximum malleability was observed when the PMMA annealed at 90 °C. The lowest value of the malleability for the PMMA occurred at 130 °C. The maximum improvement

for the malleability at yielding was seen at 90 °C. This improvement is about 96 % with a value of 3.35 %. From Figure 4 and 5, PMMA has good combination of high yield strength and malleability at 90 °C. Based on these data, it may be concludes that the PMMA annealed at 90 °C produced the highest formability

under compressive forces without rupture.

Modulus of resilience is a material parameter of interest to the machine designer and it is the ability to absorb energy without permanent deformation [17]. The dependence of the modulus of resilience on annealing temperatures

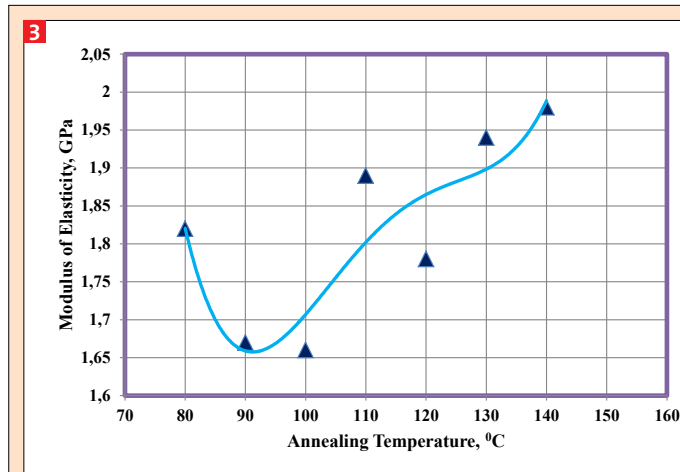


Figure 3: Effect of increasing annealing temperatures on the modulus of elasticity for the polymethylmethacrylate (PMMA).

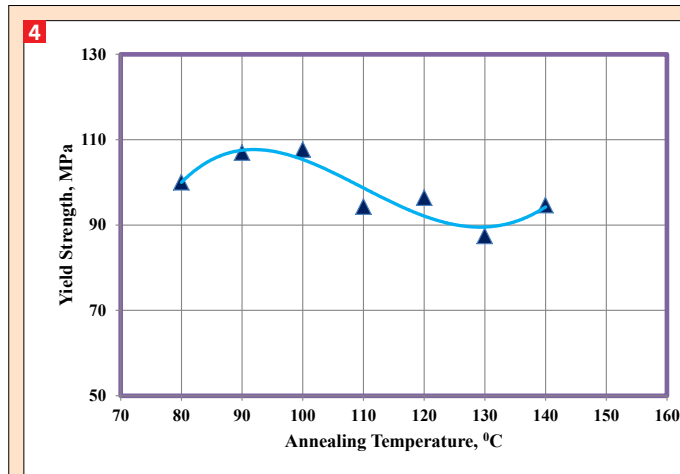


Figure 4: Influence of increasing annealing temperatures on the compressive yield strength for the polymethylmethacrylate (PMMA).

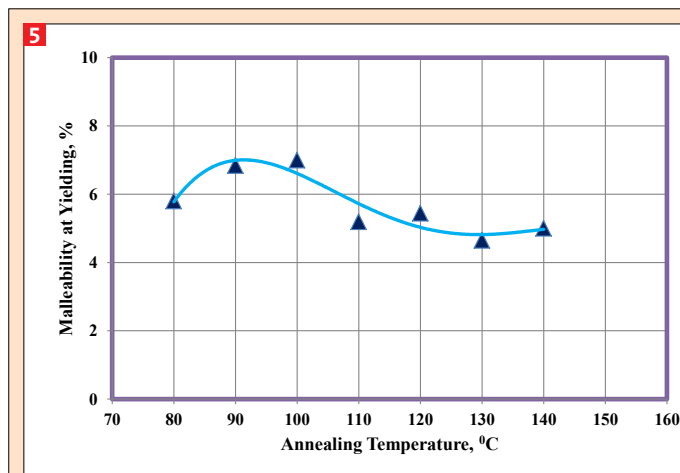


Figure 5: Effect of increasing annealing temperatures on the malleability at yielding for the polymethylmethacrylate (PMMA).

for polymethylmethacrylate (PMMA) is shown in Figure 6. Annealing temperatures were a powerful effect on the modulus of resilience. Modulus of resilience first increased and then decreased when annealing temperatures increased. The reason for this behavior is attributed to the yield strength, since the modulus of resilience is proportional to the yield strength. It was observed that the maximum modulus of resilience value of 3.66 MJ/m^3 was obtained in the PMMA annealed at 90°C . The PMMA annealed at 130°C exhibited the lowest modulus of resilience than other annealing temperatures. The maximum improvement for the modulus of resilience was seen at 90°C . This improvement was about 152% with a value of 2.21 MJ/m^3 . This means that the PMMA can be heat-treated by annealing at 90°C to produce resilient polymer has high yield strength and low modulus of elasticity.

4. Conclusions

This study was undertaken to investigate the effect of annealing temperatures on the Shore hardness number and compressive properties in elastic deformation zone of PMMA. Annealing temperatures were a powerful effect on the Shore hardness number and compressive properties of PMMA. An increase in Shore hardness number, compressive yield strength, malleability at yielding, and modulus of resilience were observed in the PMMA after heat-treating than as-received PMMA. Annealing of PMMA at temperatures below its glass-transition temperature (T_g) produced the highest values of compressive yield strength, malleability at yielding, and modulus of resilience. The maximum compressive yield strength, malleability at yielding, and modulus of resilience were obtained in the PMMA annealed at 90°C . This study suggests that in order to optimize compressive properties in elastic deformation zone of PMMA, it is important to subject it to annealing heat-treating below its glass-transition temperature (T_g). ■

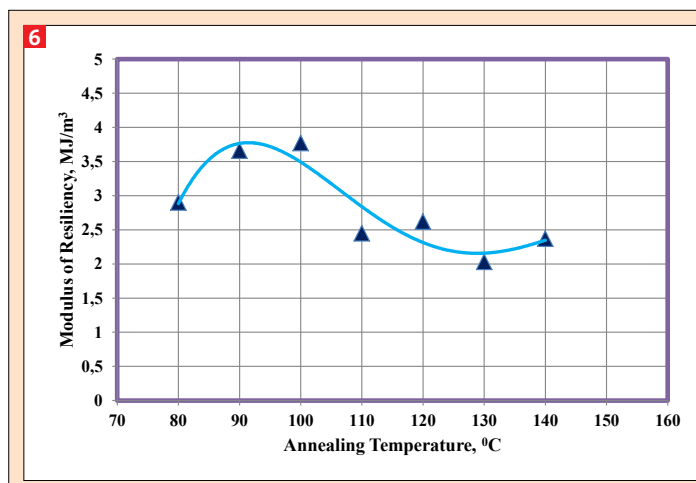


Figure 6: Effect of increasing annealing temperatures on the modulus of resilience for the polymethylmethacrylate (PMMA).

REFERENCES

- [1] Eduardo de Avila, Jaeseok Eo, Jihye Kim, Namsoo P. Kim, Heat Treatment Effect on Mechanical Properties of 3D Printed Polymers, MATEC Web of Conferences 264, 02001 (2019), 1-6.
- [2] Ameer A. K., Mousa M. O. and Ali W. Y., EG-TRIB Journal, 14:3, (2017), 66-83.
- [3] Kalpakjian S., Schmid S. R., Manufacturing Engineering and Technology, Sixth Edition, Prentice Hall, (2009), 177-180.
- [4] C. Weckle, Polycarbonate Remains Proven and Preferred for Medical Applications, Tech Briefs : Medical Desi Medicine, Second Edi. (2011), gn Briefs., MEical Design Briefs, (2013).
- [5] Mahmoud Gallab, Mohamed Taha, Ahmed Rashed, Ahmed Nabhan, Egypt. J. Chem., 65: 8, (2022), 1-9.
- [6] Sakaguchi RL, Powers JM. Craig's Restorative Dental Materials-E-book. Elsevier Health Sciences; (2012).
- [7] Ameer A. K., Mousa M. O., Ali W. Y., Samy A. M. and El-Abd A. H, SVU-International Journal of Engineering Sciences and Applications, 3: 2, (2022), 68-79.
- [8] Jancar, J, Hynstova, K. and Pavelkam, V., Comp. Sci. Technol., 457: 3, (2009), 62-69.
- [9] Badran A., Hamdy K., Rashed A., EGTRIB Journal, 19: 2, (2022), 36-47.
- [10] Mariam Shbanah, Márton Jordanov, Zoltán Nyikes, László Tóth and Tünde Anna Kovács, Mechanical Properties, Polymers, 15, (2023), 1587.
- [11] Alaa A. Mohammed, Jawad K. Oleiwi and Emad S. Al-Hassani, Journal of Biomimetics, Biomaterials and Biomedical Engineering, 54, (2022), 119-128.
- [12] A. A. Aly, E. B. Zeidan, A. M. Hamed, W. Y. Ali, EGTRIB Journal Of The Egyptian Society of Tribology, 7, (2010), 52-64.
- [13] Ayman A. Aly, International Journal of Materials Chemistry and Physics, 1:2, (2015) 132-140.
- [14] Maria Luisa Di Vona, Annealing of Polymer Membranes, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, (2014) , DOI 10.1007/978-3-642-40872-4_627-1.
- [15] Khurmi R. S., N. Khurmi, Strength of Materials, S. Chand, New Delhi, (2005), 724.
- [16] ASM International, ASM Handbook Volume 8, Mechanical Testing and Evaluation, American Society for Metals, Metals Park, Ohio, (2000), 339.
- [17] Robert L. Norton, Machine Design an Integrated Approach, Third Edition, Pearson Prentice Hall, (2006), 39-66.

Hydrosilylation · Crosslinking · EPDM-elastomers · EPDM-Rubber · Fuel Cells · Diene

In the present article, the hydrosilylation crosslinking chemistry is explored for EPDM elastomers, containing vinyl groups as side chains, as possible alternative to liquid silicon rubber (LSR) within fuel cell application. As such, EPDM could outperform LSR due to its lower density, costs and higher resistance to acidic conditions. The hydrosilylation reaction is first studied at the molecular level with organic model compounds, thereafter, scaled towards polymers and compound formulations. The reaction kinetics can be influenced by the EPDM polymer composition, specifically by the amount and kind of dienes incorporated in the chain. The effect of the presence of oil and carbon black in the compound are also studied for the hydrosilylation reaction.

Die Auswirkungen von Dien-Typ und -Gehalt auf das Vernetzungsverhalten von EPDM durch Hydrosilylierung

Hydrosilylierung · Vernetzung · EPDM-Elastomeren · EPDM-Kautschuk · Brennstoffzellenanwendungen · Diene

In dieser Arbeit wird die Vernetzungschemie der Hydrosilylierung von EPDM-Elastomeren, die Vinylgruppen als Seitenketten enthalten, als Alternative zu flüssigem Silikonkautschuk (LSR) in Brennstoffzellen-Anwendungen untersucht. Aufgrund seiner geringeren Dichte, seiner geringeren Kosten und seiner höheren Säurebeständigkeit könnte EPDM LSR übertreffen. Die Hydrosilylierungsreaktion wird zunächst auf molekularer Ebene anhand organischer Modellsystemen und anschließend in Polymer und Compound-Formulierungen untersucht. Die Reaktionskinetik kann durch die EPDM-Polymerzusammensetzung beeinflusst werden, insbesondere durch die Menge und Art der in den EPDM-Polymerketten eingebauten Diene. Ebenfalls untersucht wird der Einfluss von Öl und Ruß im Compound auf die Hydrosilylierungsreaktion.

Figures and Tables: By a kind of approval of the authors.

The Effects of Diene Type and Content on the Hydrosilylation Crosslinking behaviour of EPDM

Introduction

The new electrification trends in the automotive industry open the ways for new applications and technical opportunities. One important example is given by the architecture of fuel cells cars, in which the oxidation of hydrogen (H_2) provides propulsion via an electric engine. In terms of mobility, fuel cells operate at a conversion efficiency of about 60% or more and produce lower emissions than internal combustion engines (ICEs), with water as the main combustion by-product [1]. Safe, environmentally friendly, and reliable energy supplies of H_2 are essential to mankind for sustainability and a high quality of life, although their provision is subjected to social, political, environmental, and economic challenges [2,3].

Fuel cells require the use of several battery cell stacks, which can contain up to 300 bipolar plates, individually separated by seals. State-of-the-art fuel seals of cells stack employ liquid silicone rubber (LSR), due to a favourable combination of low temperature flexibility, high thermal and oxidative resistance, low surface tension, good dielectric properties and low viscosity. The latter is of extreme importance for injection moulding applications [4, 5]. However, the major drawbacks of LSR are lower acid resistance, high density, and relatively high cost.

LSR vulcanizates are typically prepared from vinyl polydimethylsiloxane (PDMS) with polymethyl-hydrosiloxane (PMHS) as crosslinking agent in the presence of platinum (Pt) catalyst using solution casting technique [6]. The crosslinking reaction is catalytic hydrosilylation, for which the mechanism was elucidated by Chalk and Harrod (Figure 1) [7]. The crosslinking system is extremely clean, since it requires a stoichiometric amount of silane against the vinyl moieties and just leaves very low levels of catalyst residues, which is important for electrical resistance in fuel cells application. Ethylene-propylene-diene polymers (EPDM, see Figure 2) are the most widely used rubbers in the range of available synthetic rubbers for non-tire applications [9].

Due to its saturated polymer backbone, EPDM can be employed in various demanding applications, requiring for instance resistance to ozone, heat and acids, low temperatures flexibility, low gas permeability, as well as a wide range of tensile strength levels. The high flexibility of the polymer chain, moreover, creates physical entanglements in the melt, which contribute to the final rubber network upon crosslinking, thereby allowing to formulate lightweight compounds with high total compound levels and economic benefits for the customers. The inclusion of non-conjugated dienes ensures the presence of unsaturated bonds along the chain, allowing for crosslinking. Various dienes are used in the industry, the most common being 5-ethylidene-2-norbornene (ENB), but also 1,4-hexadiene, dicyclopentadiene (DCPD) and 5-vinyl-2-norbornene (VNB) as shown in Figure 3. The latter is particularly of interest for this paper, in hydrosilane crosslinking.

Arlanxeo produces a variety of EPDM grades under the tradename Keltan at three global production sites, i.e., Triunfo (Brazil), Changzhou (China) and Geleen (The Netherlands).

Authors:

Roger Postema, Raffaele Bernardo, Ger Rademakers, Martin van Duin, Arlanxeo Netherlands B.V., Geleen, The Netherlands

Corresponding Author:
Roger Postema
Arlanxeo Netherlands B.V.
Geleen, The Netherlands
E-Mail: roger.postema@Arlanxeo.com

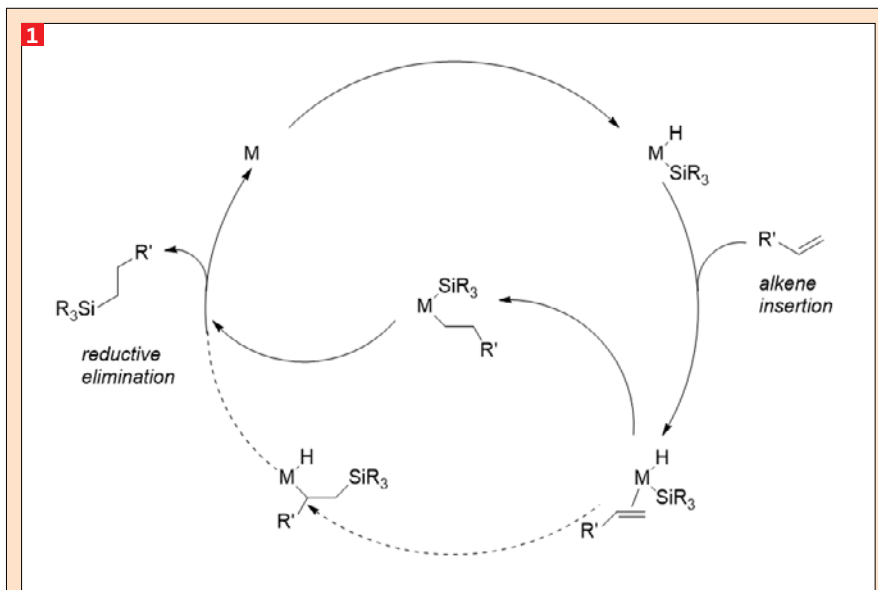


Figure 1. (Modified) Chalk-Harrod mechanism for hydrosilylation of alkenes (M is active catalyst site), redrawn from reference [8].

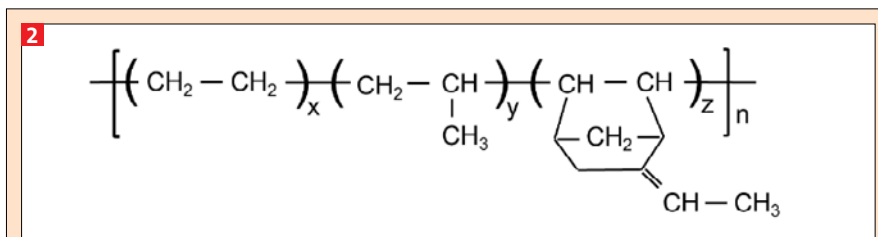


Figure 2. Chemical structure of EPDM polymer chain with 2-ethylidene-5-norbornene (ENB) as diene.

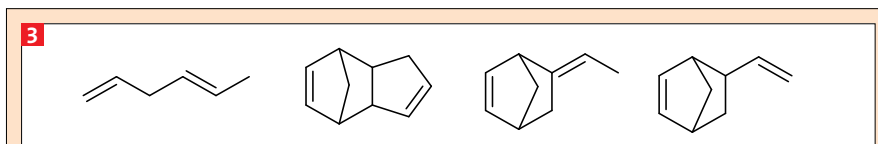


Figure 3. Chemical structures of various diene monomers applied for EPDM, from left to right: 1,4-hexadiene, DCPD, ENB and VNB.

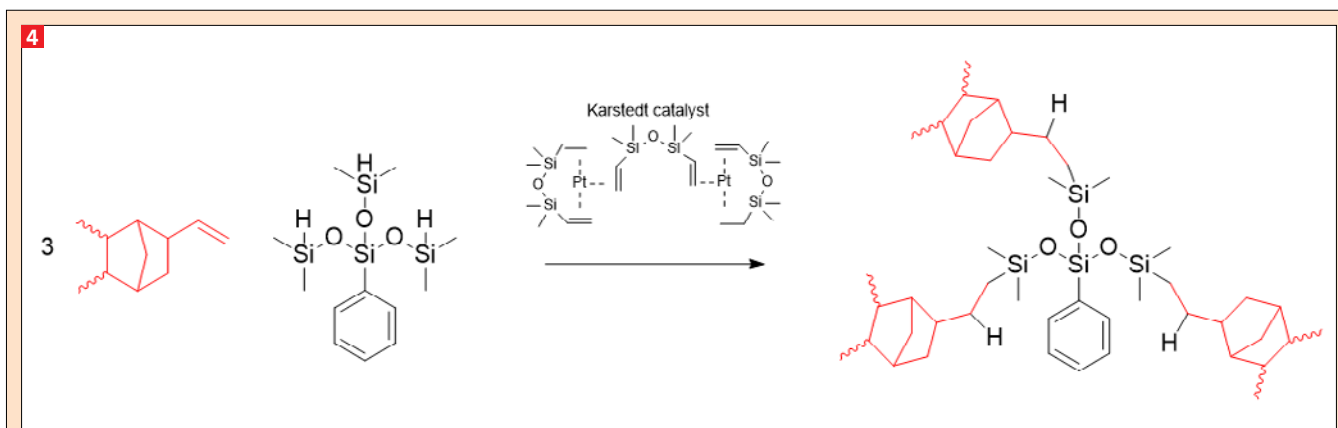


Figure 4. Reaction scheme for crosslinking of VNB-EPDM with tris(dimethylsiloxy)phenyl silane (TPS). Moieties are coloured to guide the eye.

EPDM-based vulcanizates are widely used in automotive applications, such as sealing systems, windshield wipers, engine mounts, grommets, radiator hoses and belts.

EPDM is crosslinked mainly employing sulphur (S) or peroxides (Px) systems. Combined, they accrue for about 95 % of the total industrial volume of EPDM vulcanizates. For sulphur vulcanization, the formation of a soluble complex of zinc, accelerator, elemental sulphur, and stearic acid forms the active species. The reaction proceeds via subsequent substitution of allylic H-atoms of the incorporated dienes (without consumption of unsaturation) yielding a 3D network connected by sulphur bridges. For this vulcanization system, the presence of ENB within EPDM is crucial, since this molecule provides moieties with a relatively high number of allylic protons [10]. The formed 3D rubber network has good dynamic properties, thanks to the tendency of sulphur bridges to break and reform [11,12].

Peroxide crosslinking follows a rather different reaction path than sulphur vulcanisation. The active species is a radical, formed from the decomposition of the peroxide which initiates combination and addition reactions. The 3D network is linked by C-C bonds, which are very resistant to heat and ageing [13]. The industry employs molecules with terminal unsaturation (coagents) to boost the crosslinking rate and density. Polymers containing VNB display, *de facto*, a built-in coagent [14,15] and allow for a more efficient use of the peroxides, with cost savings and reduced blooming for the final product [16]. Another important function of incorporated VNB in EPDM is the use of the remaining vinylic bond for

obtaining controlled long chain branching in the polymer. Developed 25 years ago, it is still successfully applied today by Arlanxéo for many EPDM grades [17], ensuring enhanced compound processing.

The presence of VNB units in the EPDM polymer chain, with its highly reactive vinyl moieties, could open the way for hydrosilylation crosslinking for EPDM. As such, EPDM could outperform LSR based on its lower hydrogen permeability and better acid resistance [18], both needed for a good performance of the fuel cells stack seals, with additional advantages of lower costs and density. Using a di or multi-functional silane and a Pt-based Karstedt catalyst, hydrosilylation crosslinking is indeed applicable to VNB-EPDM [19], being a realistic alternative to LSR. By the nature of the hydrosilylation mechanism (Figures 1 and 4), residual unsaturation of the VNB moieties is consumed. Therefore, even enhancing the heat resistance of the final vulcanizate is enhanced, compared to the state-of-the-art peroxide crosslinking.

In this paper, the crosslinking with a Pt-catalysed hydrosilylation system is studied and applied in EPDM-based formulations, using tris(dimethylsiloxy)phenylsilane (TPS) as a trifunctional hydrosilane compound.

The approach is studied first using low-molecular weight models, i.e., selectively hydrogenated ENB (ENBH) and VNB (VNBH) monomers as representative compounds. Compounds VNBH and ENBH are the hydrogenated versions of

VNB and ENB, which are used as third monomers in the production of EPDM. The internal double bond is hydrogenated, mimicking the polymer chain with incorporated third monomer, allowing fast and full solubility and the possibility of using molecular characterization techniques for the reaction intermediates and products. Based on the results of the model study, the hydrosilylation reaction was studied for EPDM polymers in a fuel cell-like recipe, varying the ratio of VNB and ENB in the polymer. The effects of the addition of some carbon black or oil to the basic recipe were also studied.

All polymer samples were produced at pilot plant scale using an advanced catalyst system. Their characteristics are reported in Table 1. To match the application requirements (low temperature flexibility and good injection moulding), it was decided to focus on amorphous polymers (molar ratio ethylene/propylene ~1) with relatively low viscosity.

Polymer characterization of all EPDM rubber samples was performed by Mooney viscosity (ISO289), DMA (dynamic mechanical analysis, for long chain branching, using the difference of phase angles at the frequencies of 0.1 and 100 rad/s) and FT-IR (Fourier-transform infrared spectroscopy, for composition, according to ASTM D3900 and D6047), using respectively Alpha Technology MV2000, Montech MDR3000, and Perkin Elmer Spectrum One.

Experimental part

Model reaction study

The model reaction study has been performed at lab scale with VNBH (5-vinyl-norbornane) and ENBH (5-ethylidene-norbornane) as model compounds (Figure 5).

The stock materials were stored at -20 °C and dried over molecular sieves 3A, prior to use.

The applied dihydro-silane compound is 1,1,3,3,5,5-hexamethyltrisiloxane, abbreviated as SiH_2 , which was used as a bifunctional hydrosilane curative with a Pt-based Karstedt catalyst, i.e., platinum (0)-1,3-divinyl-1,1,3,3-tetramethyldisiloxane. The catalyst was available as a 2.2 %wt Pt solution in xylene (Sigma Aldrich) and further diluted with xylene to achieve a 0.22 wt.% solution. Dosing of catalyst was as high as 0.020 mg.

The reactions between the silane and model compound were performed in a small 20 mL glass vial, filled with a mixture of n-octane in n-decane (10 % v/v) as internal standard, and a total reaction volume of 12.5 mL. For the model experiments with VNBH, a catalyst/VNBH ratio of 1:46 was chosen, as well as a SiH_2 /VNBH molar ratio of 1:2 (1 to 1 equivalent). For the model experiments with ENBH, a catalyst/VNBH ratio of 1:276 was chosen, as well as a SiH_2 /ENBH molar ratio of 2:1 (1 to 1 equivalent).

Reactions were performed both at ambient temperature and 90 °C. The reaction was monitored via gas chromatography (GC), using Agilent 5975C system with VF-5ms column (30 m, 0.25 mm, 0.50 μm , 5 % phenyl groups in dimethylpolysiloxane polymer) and helium as carrier gas. The injection volume is 1 ml with a split ratio of 100:1. The applied temperature profile is starting from 1 min at 40 °C, followed by a temperature increase with 15 °C/min to 300 °C, and a final isotherm phase of 5 min. Detection was done via mass spectrometry (MS) for identification (source and quad temperatures of 250 °C and 230 °C, respectively) and flame ionization detection (FID) for quantification (flame temperature 300 °C). Di-butyl maleate (DBM) is added to the final reaction mixture as a reaction stopper with a molar ratio of DBM to catalyst of 300. The material is generally added in compounding to optimize scorch safety.

Compound evaluation

The rubber compounds were mixed in a GK 1.5 L internal mixer, followed by the

1 Table 1. Characteristics of EPDM polymers employed in present study

Property	unit	EPDM-1	EPDM-2	EPDM-3	EPDM-4	EPDM-5
ML(1+4) 125 °C	MU	29	25	66	25	25
Ethylene content	wt. %	49	50	56	46	50
ENB content	wt. %	0	0	2.1	6	3.1
	mmol/100gram	0	0	17	50	26
VNB content	wt. %	0.8	1.6	0	0.8	1.4
	mmol/100gram	7	13	0	7	12
$\Delta\delta$	[°]	4	2	27	11	4

2 Table 2. Simplified non-black, fuel cell seal recipe

Ingredient	Chemical	Amount [phr]
Rubber	Ethylene-propylene-diene terpolymer	100
White filler	Silica	45
Stabilizer	Tetrakis-methylene (3,5-di-t-butyl-4-hydroxyhydrocinnamate)methane	1
Silane crosslinker	Tris(dimethylsiloxy)phenylsilane (TPS)	3
Catalyst*	K-cat (Pt)	<0.01
Total		149

addition and mixing of the crosslinking package on a 2-roll mill at ambient temperature. The crosslinking behaviour of all involved formulations was monitored via moving die rheometer (MDR) at a temperature of 170 °C

A simplified fuel cell-like gasket recipe (Table 2) was used for the investigation, using EPDM rubber samples listed in Table 1. The polymer, filler and stabilizer were mixed in a GK 1.5 L internal mixer, reaching the final mixing temperature by mixing shear. The masterbatch was divided in 10 portions, the TPS and catalyst were pipetted during mixing on a 2-roll mill at ambient temperature.

This recipe was also used for quantifying the effects of the addition of some carbon black and oil, via using the same recipe of table 2 but adding 20 phr of oil and/or 5 phr of carbon black.

Results and discussion

Model compound study

The reaction between VNBH and SiH_2 with molar a ratio 2:1, in presence of catalyst, was studied at room temperature (RT) and 90 °C. In both cases, the reaction proceeded very fast, probably due to the low steric hindrance around the terminal vinyl unsaturation. In Table 3, the conver-

Table 3. Conversion of VNBH and ENBH model compounds (reaction time ca. 5', diene/Si 1/1 equivalents)

Sample	T (°C)	Conversion (%)
	RT	~47
VNBH	90	>95
ENBH	90	3

sion values for a reaction time of 5 minutes are reported. For the reaction of VNBH at 90 °C, the reaction was practically completed prior to 5 minutes of analyses, with a conversion higher than 95 %. The GC trace shows peaks arising from the unreacted VNBH and the products (Figure 6). The addition of the silane yields either an exo or endo isomer, depending on its position with respect to the longest bridge (endo=syn; exo=anti). Unfortunately, the analytical resolution does not allow to distinguish between exo- and endo-isomers.

For the reaction products, two different peak sets are identified corresponding to the mono-coupling product (Figure 7) and di-coupling product (Figure 8).

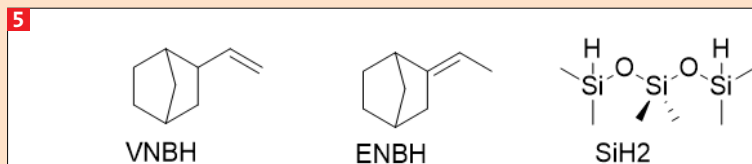


Figure 5. Chemical structures of model olefins (VNBH and ENBH), 1,1,3,3,5,5-hexamethyl-trisiloxane (SiH_2).

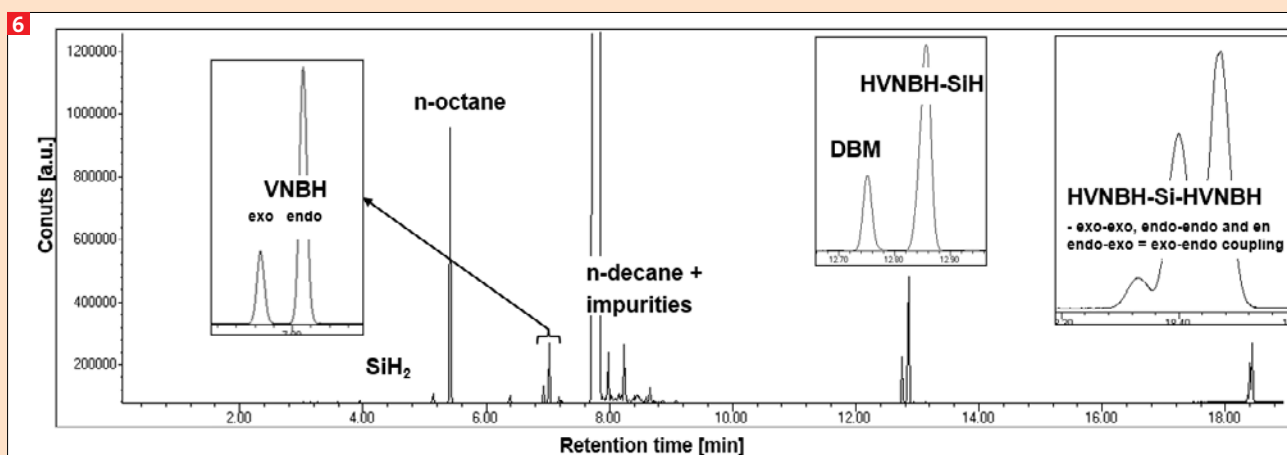


Figure 6. GC-MS chromatogram of reaction mixture of VNBH and SiH_2 , in presence of the Pt based catalyst at 90 °C and DBM as inhibitor.

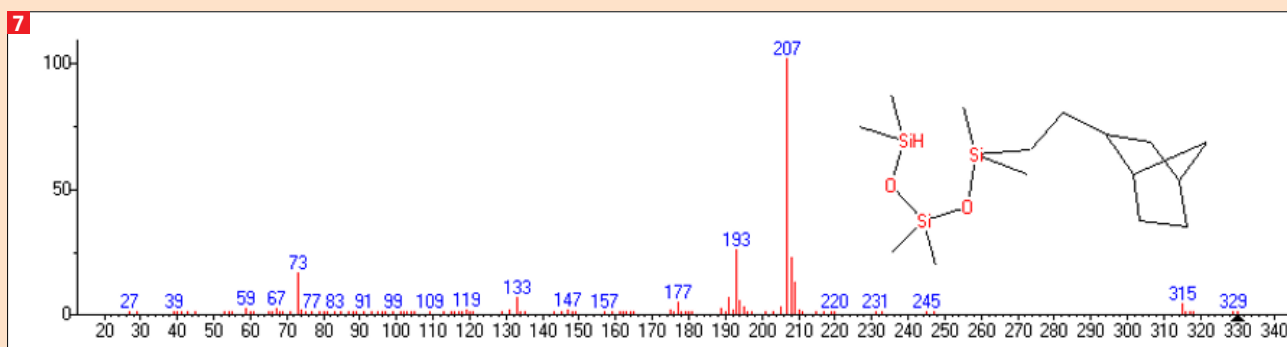


Figure 7. MS spectra and assignment of peak for the identified mono-coupling reaction product of VNBH and SiH_2 , 207(M+, 49% VNBH- SiH_2 - HVNBH), 193 (M+ 13%, VNBH- SiH_2 - SiH_2 - CH_3), 73 (M+ 8%, $\text{Si}-(\text{CH}_3)_3$).

The spectra concern a typical fragmentation of SiH_2 with $m/z-1$ of 329 is related to the HVNBH-SiH mono-adduct.

The spectra concern a typical fragmentation of SiH_2 with $m/z-1$ of 452 is related to the HVNBH-Si-HVNBH di-adduct.

In Figure 9, the FID trace of the reaction

of ENBH with SiH_2 is depicted, showing only the formation of the 1:1 coupling product. The hydrosilylation crosslinking of ENBH, however, did not proceed as fast as VNBH, with only a conversion of 3% at 90 °C after 5 minutes of reaction. This is in line with the lower reactivity of

the double bond of ENBH compared to VNBH, probably due to the steric hindrance of the methyl substituent on the substrate, during the catalytic cycle.

To further clarify the effects of the double bond substitution on the hydrosilylation reaction, a mixture of VNBH and

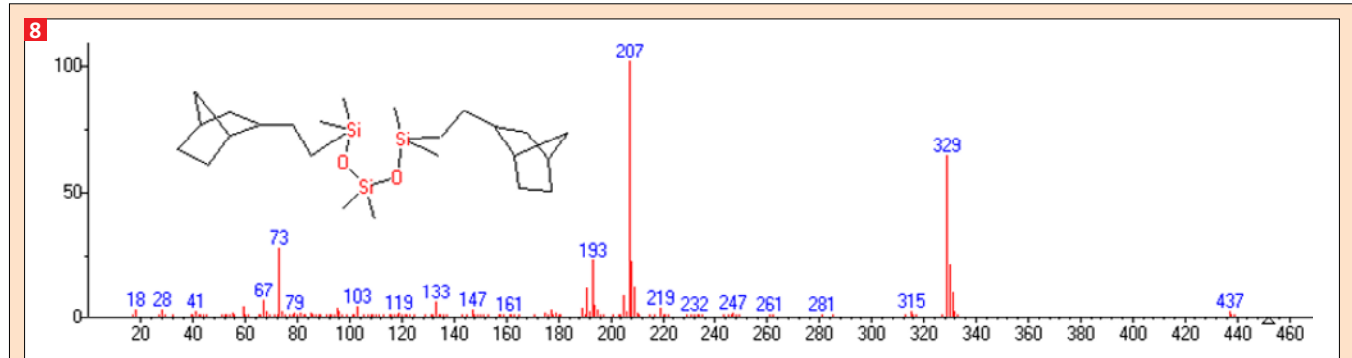


Figure 8. MS spectra and assignment of peak for the identified di-adduct reaction product of VNBH and SiH_2 : 329, ($M+$, 22 %, VNBH $_2$ - SiH_2 - HVNBH), 207($M+$, 34 %, VNBH- SiH_2 -VNBH - HVNBH - VNBH) 193($M+$ 7.5 %, VNBH- SiH_2 - SiH_2 - CH_3), 73 ($M+$ 8 %, $\text{Si}-(\text{CH}_3)_3$).

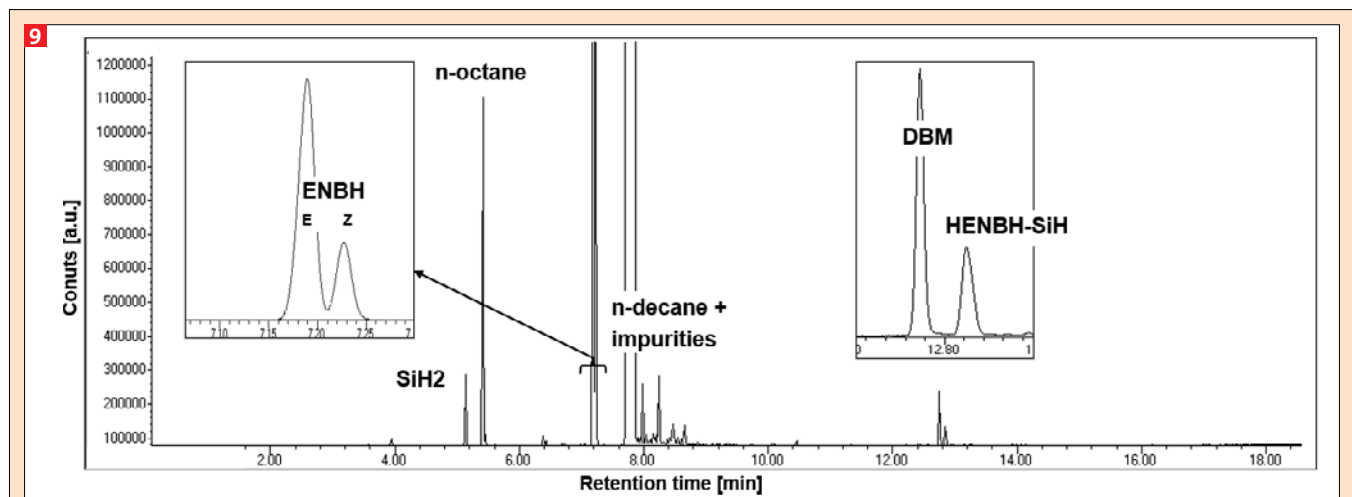


Figure 9. GC-FID chromatogram of reaction between ENBH model compound and SiH_2 , with Pt catalyst at 90 °C and DBM as inhibitor.

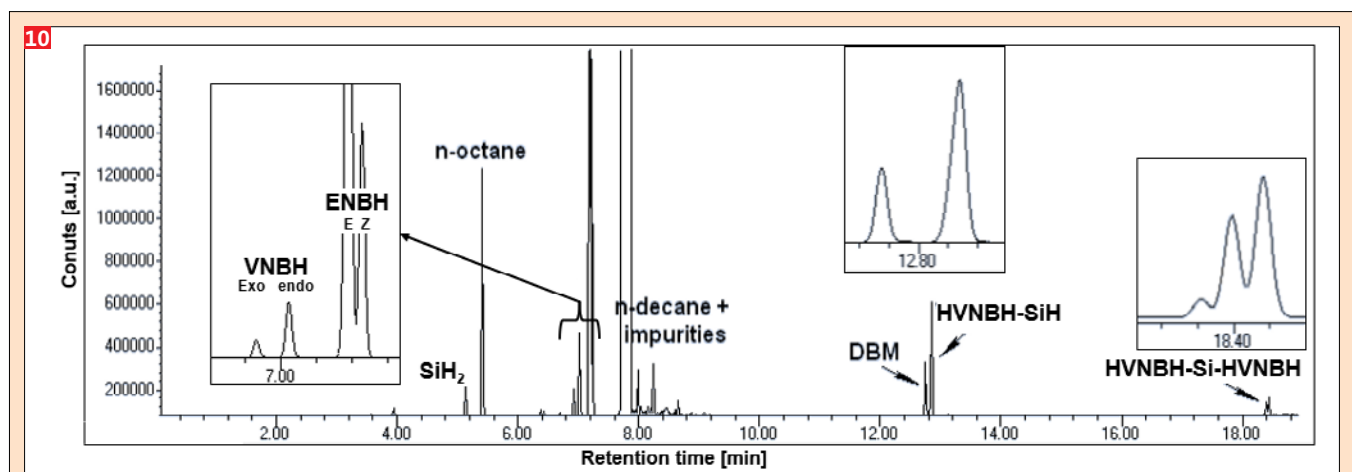


Figure 10. GC-FID chromatogram of reaction between of VNBH and ENBH with model compounds SiH_2 .

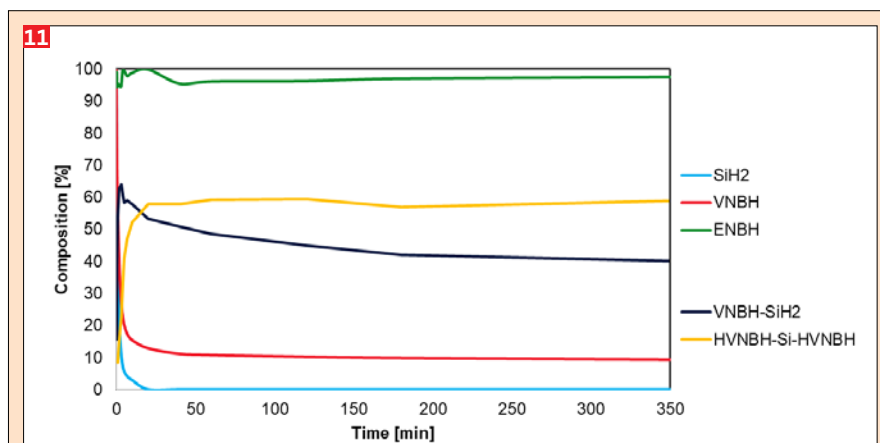


Figure 11. Competition experiment with VNBH/ENBH mixture with Pt-Catalyst at 90 °C (GC-FID data). Lines are intended only to guide the reader's eyes.

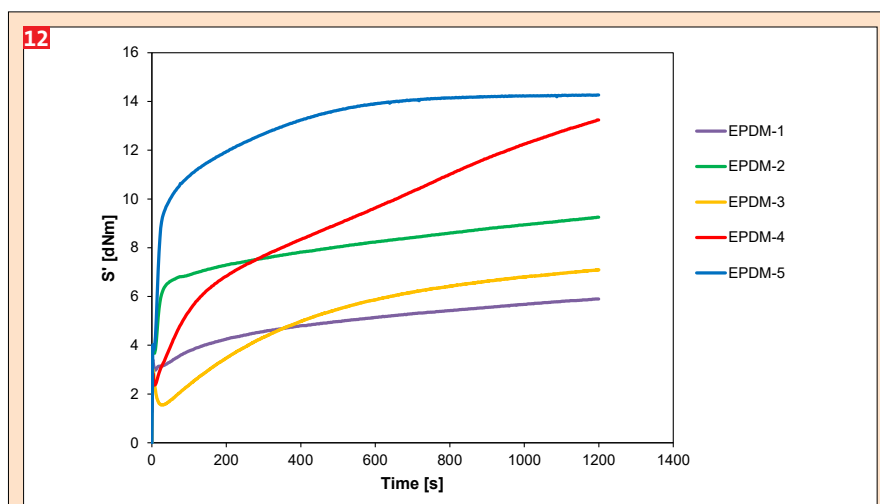


Figure 12. Rheometer curves for hydrosilylation crosslinking of EPDM polymers.

ENBH was used as reactant, simulating a competition experiment. ENBH was dosed in a molar ratio 6/1 with respect to VNBH, to account for its lower reactivity. In Figure 10, FID trace of the hydrosilylation reaction of ENBH/VNBH mixture with SiH_2 is reported. Whilst the reaction proceeded towards the formation of HVNBH SiH and $(\text{VNBH})_2\text{-Si}$, the kinetic was influenced, for a conversion of about 80% of VNBH in the first 5 minutes, which is at odds with a level of >95% when no ENBH was present in the reaction medium.

A possible explanation is that ENBH coordinates to the Pt active sites without proceeding further (or appreciably) towards the catalytic cycle. Such phenomenon would be also favoured by the higher amount of ENBH present in the reaction medium, which displaces the competition equilibrium in favour of ENBH. Within the studied competition reaction,

the presence of ENBH could have the net effect of blocking the Pt active sites, thereby lowering the overall hydrosilylation reaction with VNBH. Further studies should be devoted to corroborating this hypothesis (amongst others, identification of the Pt-ENBH coordination adduct).

In Figure 11, the composition of the reaction mixture as a function of time is shown, for the hydrosilylation competition experiment between VNBH and ENBH at 90 °C. From the competition experiments, it is learnt that SiH_2 is consumed fast, the VNBH is consumed fast to form both mono and bi-adducts, while ENBH is hardly consumed in the reaction. This corroborates the hypothesis that ENBH lowers the catalyst active sites, while the reaction proceeds mostly with VNBH.

Compound evaluation

The model study confirmed the feasibility of the hydrosilylation reaction on-

vinyl double bonds, which encouraged the test for crosslinking EPDMs with various diene types and contents (Table 1). The low-filled formulation of the fuel cell compound basically consists of the rubber, silica, and a stabilizer. Despite the absence of any processing oil, efficient polymer shear ensures the uptake of the ingredients in the dry compounds during mixing and milling.

The crosslinking data are reported in Table 5 and the crosslinking curves are shown in Figure 12.

As can be observed from Figure 12, EPDM-1 has a moderate state of crosslink and fast kinetics, in line with the presence of VNB. By doubling the amount of VNB (EPDM-2), both the state of crosslinking and kinetics drastically improve. A fast reaction is reached (as expected), although without reaching high levels of torque, conversely, crosslink. This could be due to the fact that the reaction is so fast, that all the VNB sites are monosubstituted with the silane, hence hampering the formation of a 3D network. Slowing down the kinetics, would possibly allow to favour the coupling of chains, hence increasing the torque.

In line with the model studies, a polymer featuring only ENB (EPDM-3) would not have a fast crosslink kinetic or a high state of crosslink. This is confirmed by testing this polymer sample; a very slow crosslink reaction is reached (as estimated by the small slope of the MDR curve). A higher level of torque, compared to EPDM-1 and EPDM-2, is reached simply because this sample features a higher level of Mooney viscosity. By including both ENB and VNB in the polymer it is possible to modulate effectively the vulcanisation kinetic and state of crosslinking. By including ENB and VNB in a ratio of 7.5 (EPDM-4), the kinetics is so retarded that a marching modulus is ob-

5 Table 5. Rheometer data for hydrosilylation crosslinking with EPDM polymers. Note that t_2 and ML data cannot be accurately measured for samples 1, 2, 4 and 5 due to high initial speed, particularly when higher VNB contents are present.

Sample	t_{90} (min)	MH after 20 min (dNm)
EPDM-1	13.0	6
EPDM-2	10.0	9
EPDM-3	13.2	7
EPDM-4	11.2	13
EPDM-5	6.0	14

served. Encouragingly, a higher torque is reached at 20' vulcanisation, although the reaction is still not complete.

By modulating the ratio between ENB and VNB towards a level of 1.8 (EPDM-5), a complete crosslink reaction can be achieved in industrially relevant times with a very high torque. This implies that an efficient level of 3D network is achieved very fast (which is a requirement for this application) and under a safer scorch process, so to avoid that the compound does not already crosslinks during the injection moulding and manufacturing of the final fuel cell plate.

As the reaction between the silane and VNB is stoichiometric, the final state of crosslinking MH can be optimised with the proper molar ratio between the silane and the VNB content (Figure 13). For substoichiometric TPS/vinyl ratios, the torque remains low since not a full crosslinking degree is reached. For substoichiometric vinly/TPS ratios, the torque remains low since the mono-silanisation product is, presumably, more favoured, leading to an ineffective 3D network formation. The optimum is close to the stoichiometric ratio expected between the TPS and vinly moieties, as follows from the mechanism in Figure 1.

In practical terms, by designing the composition ratio of ENB and VNB, it is possible to optimise the crosslinking behaviour (both in terms of speed and final state of crosslinking) in hydrosilylation. The effect of paraffinic oil and carbon black on the applied fuel cell compound was investigated. For ease of investigation and handling, EPDM-4 was used. This polymer showed the slowest crosslinking kinetics and it will maximize possible differences. As it is possible to see from Figure 14, the final state of crosslinking is influenced, although the shape of the MDR curve is not affected. This suggests that neither oil nor carbon black influences the crosslinking reaction but dilute the network (oil) or increase the torque (carbon black) via reinforcing.

Conclusions

Based on the results of this study, it can be concluded that hydrosilylation using trifunctional hydrosilanes and Pt-based Karstedt catalyst is a versatile and clean crosslinking method for VNB-containing EPDM polymers. Model reactions clarified that the crosslinking takes place on vinyl moieties of VNB, whereas the presence of ENB slows down the reaction rate. The conclusions and learning of the

model compound study can be translated to, commercially relevant, compound studies. By modulating the EPDM composition, in terms of ENB and VNB contents of the polymer, it is possible to fine tune both crosslinking kinetics (regulating the scorch safety) and the final compound torque in the fuel cell compounds. Relatively small amounts of carbon black and oil revealed to be non-detrimental to the hydrosilylation reaction. Taken altogether, VNB containing polymers can be effectively crosslinked via hydrosilylation chemistry. Polymer and compound compositions can influence crosslinking kinetic and final state of cure, respectively, thereby allowing for a toolbox to fine tune the vulcanizate performances with respect the requirements of the fuel cells application. ■

REFERENCES

- [1] ARLANXEO webinar series, Innovation x Sustainability, Improving the Elastomer Sealing Performance in Hydrogen Fuel Cells, Dec 1st, 2022.
- [2] S. Satyapal, DLA Worldwide Energy Conference, Hydrogen and Fuel Cell Overview, April 12th, 2017.
- [3] L. Fan, Z. Tu, S. Chan, Recent development of hydrogen and fuel cell technologies: A review, Energy Reports (2021) 8421-8446.
- [4] M. Bont, A review of liquid silicone rubber injection moulding: process variables and process modelling, Polymer Engineering and Science, 61 (2021) 331-347.
- [5] Y. Nakajima, S. Shimada, Hydrosilylation Reaction of Olefins: Recent Advances and Perspective, RSC Advances (2013) 1-15.
- [6] G. Rajesh, Liquid Silicone Rubber Vulcanizates: Network Structure-Property Relationship and Cure Kinetics, Polymers and Polymer Composites, vol. 18, no 19 (2010) 477-488.
- [7] R. Hofmann, M. Vlatkovic, F. Wiesbrock, Fifty Years of Hydrosilylation in Polymer Science: A Review of Current Trends of Low-Cost Transition-Metal and Metal-Free Catalysts, Non-Thermally Triggered Hydrosilylation Reactions, and Industrial Applications, Polymers, 9 (2010) 534.
- [8] R. D'Amelia, Characterization and Synthesis of Functionalized Polysilalkylene Siloxane

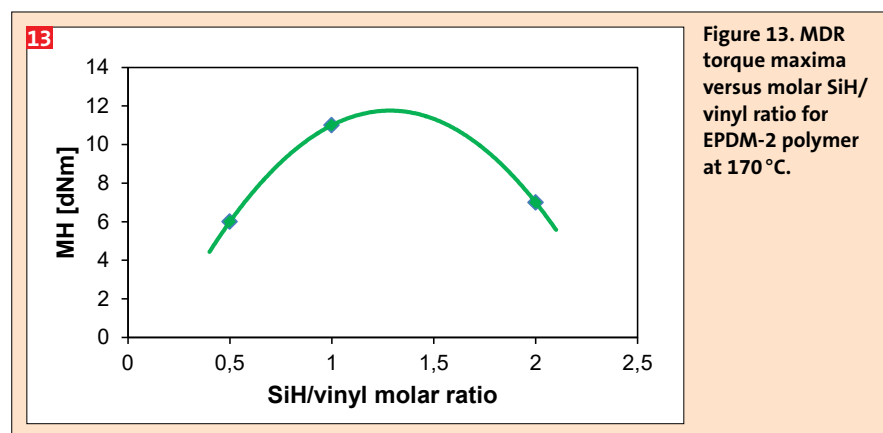


Figure 13. MDR torque maxima versus molar SiH/vinyl ratio for EPDM-2 polymer at 170 °C.

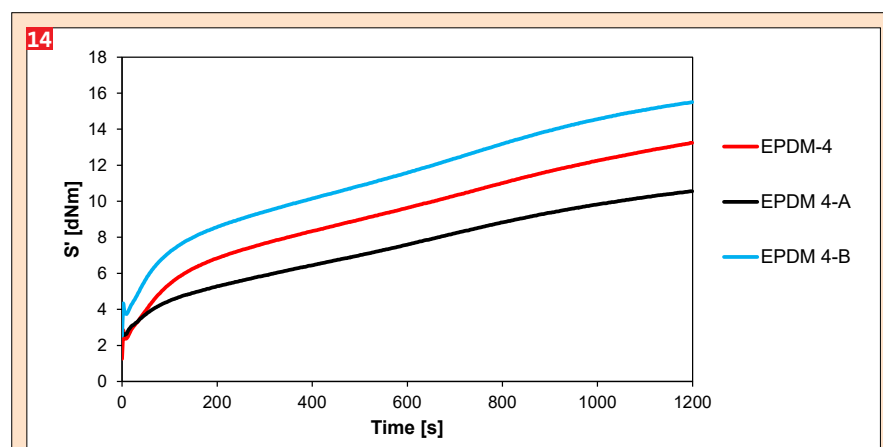


Figure 14. Rheometer curves for hydrosilylation crosslinking of EPDM-4, EPDM-4A and EPDM-4B compounds at 170 °C.

- Monomers by Hydrosilylation, World Journal of Organic Chemistry, 7(1) (2019) 5-13.
- [9] Arlanxeo Handbook of Synthetic Rubber, Chapter 12 (2020) 239.
- [10] R. Orza, Investigation of peroxide crosslinking of EPDM rubber by solid-state NMR, PhD thesis, 2008.
- [11] P. Spanos, J. Beelen, C. Goegelein, NR replacement by ultra-high molecular weight EPDM in dynamic applications, Rubber World, 251(3) (2014) 21-27.
- [12] P.R. Dluznieski, Peroxide crosslinking of elastomers, Rubber Chem. Technol., 74 (2001) 451.
- [13] C. Twigg, M. Dees, M. van Duin, Hot-Air Ageing Characteristics of Peroxide-Cured EPDM Rubber with 5-Vinyl-2-Norbornene as Third Monomer, KGK (2010) 436-445.
- [14] M. van Duin, H. Dikland, Effect of monomer type and content on peroxide curing efficiency of EPDM, Rubber Chemistry and Technology, 76(1) (2003) 132-144.
- [15] M. Alvarez-Grima, Novel coagents for improved properties in peroxide cure of saturated elastomers, PhD thesis, 2007.
- [16] M. van Duin, M. Dees, Improved peroxide curing efficiency of EPDM with VNB as third monomer in an engine mount formulation (part 2), Rubber World, 238(6) (2008) 38-43.
- [17] J. Beelen, High performance EPDM polymers based on controlled long chain branching, Kautsch. Gummi, Kunststoffe, 52 (1990) 406.
- [18] S. Nahm, Investigation of physical and mechanical characteristics of rubber materials exposed to high-pressure hydrogen, Polymers, 14 (2022) 2233.
- [19] R. Hornig, Die Alken-Hydrosilylierung bei VNB-EPDM-Elastomeren als alternativer Vernetzungsmechanismus, GAK, Jahrgang 70 (2017) 584-597.

Elastomere für Italiens Lebensmittelmarkt

KAUTSCHUKMISCHUNGEN

Gummiwerk Kraiburg, Waldkraiburg, hat sein Portfolio um Elastomermischungen erweitert, die speziell für die Anforderungen des italienischen Lebensmittelmarktes entwickelt wurden. Die Compounds ermöglichen es Herstellern von Bedarfsgegenständen mit Lebensmittelkontakt – Materiali e Oggetti a Contatto con Alimenti (Moca) – die Vorgaben der italienischen Verordnung DM 21/03/1973 zu erfüllen. Ein Großteil der Mischungen entspricht zudem den Anforderungen der US-amerikanischen FDA CFR 21 §177.2600. Bereits im Zuge der neuen deutschen BFR-Empfehlung hat sich

Kraiburg intensiv mit strengen regulatorischen Vorgaben auseinandergesetzt. Dieses Know-how wurde nun in ein Portfolio für den italienischen Markt übertragen. Das Angebot umfasst Mischungen auf Basis von NR, NBR, EPDM und FKM mit einem Härtebereich zwischen 50 Shore A und 87 Shore A. Die sorgfältig abgestimmten Rezepturen ermöglichen die Produktion sowohl farbiger als auch schwarzer Compounds. Das Ministerialdekret von 1973 legt Hygienevorschriften für Verpackungen, Behältnisse und Gebrauchsgegenstände fest, die mit Lebensmitteln oder Stoffen für den persönlichen Gebrauch



Bild: Riccardomajana – Stockadobe.com

Die entwickelte Compoundreihe erfüllt die anspruchsvollen Anforderungen der Lebensmittelindustrie.

schädlichen Stoffe in relevanten Mengen aus Bedarfsgegen-

ständen in Lebensmittel übergehen. Seit 2023 hat Italien mit einem neuen Fünfjahresplan die Kontrollen für Materialien mit Lebensmittelkontakt verschärft.

KONTAKT

Gummiwerk Kraiburg,
Waldkraiburg
www.kraiburg-rubber-compounds.com

O-Ring-Mischung für Trinkwasseranwendungen

COMPOUND Freudenberg Sealing Technologies, Weinheim, hat ein Compound für O-



Bild: Freudenberg Sealing Technologies

Das Material wurde eingehend getestet, um sicherzustellen, dass es die hohen Standards für Trinkwasseranwendungen erfüllt.

Ringe entwickelt, das alle relevanten Anforderungen für den Einsatz in Trinkwassersystemen erfüllt. Der Werkstoff bietet eine hohe Beständigkeit gegen Heißwasser, Dampf und Heißluft bis +150 °C sowie eine zuverlässige Funktion bei Temperaturen bis -50 °C (statisch). Wasser ist eine essentielle Ressource, deren Verfügbarkeit durch den Klimawandel zunehmend eingeschränkt wird. Laut einem Unesco-Bericht von 2024 haben weltweit 2,2 Mrd. Menschen keinen Zugang zu sauberem Trinkwasser. Materialien wie

70 EPDM 335DW können dazu beitragen, sichere Wassersysteme zu gewährleisten und gesundheitliche Risiken zu minimieren. Die O-Ring-Mischung besitzt laut Hersteller eine lange Lebensdauer und eine zuverlässige Dichtfunktion und erfüllt die Standards KTW-BWGL, DIN EN 681-1, ÖNORM B5014, EN 16421, CE1935/2004, WRAS BS6920, AS/NZS 4020, FDA §177.2600, KIWA BRL-K17504 und NSF/ANSI 61. Anwendungen mit ACS-Zertifizierung (Attestation de Conformité Sanitaire) sind derzeit durch ein

CLP-Zertifikat für O-Ringe mit einem Durchmesser unter 63 mm abgedeckt, eine vollständige ACS-Zertifizierung wird geprüft. Mit der EU-Richtlinie 2020/2184 wurden erstmals einheitliche Anforderungen für Materialien mit Trinkwasserkontakt festgelegt. Das Compound erfüllt laut Hersteller bereits diese neuen Kriterien. ■

KONTAKT

Freudenberg Sealing Technologies,
Weinheim
www.freudenberg.com/de

Polytetrafluoroethylene · Carbon molecules · Thermal diffusion · Smoke

After depositing the soot from the candle on a commercial grade polytetrafluoroethylene (PTFE) sheet, the sample was heated to 350 °C or more and the carbon was penetrated into the PTFE by its operation. The carbon concentration of PTFE increased as the number of operations increased, but the concentration was leveled at about 1.5 weight%. On the other hand, the weight of non-sintered PTFE increased to about 5 % weight by the same operation mentioned above.

Thermische Diffusion von Kohlenstoffmolekülen in Polytetrafluorethylen

Polytetrafluorethylen · Kohlenstoffmolekül · Thermodiffusion · Rauch

Nach der Ablagerung von Kerzenruß auf einer handelsüblichen Polytetrafluorethylen (PTFE)-Folie wurde die Probe auf 350 °C oder mehr erhitzt, wobei der Kohlenstoff in das PTFE eingedrungen ist. Die Kohlenstoffkonzentration im PTFE nahm mit der Anzahl der Arbeitsgänge zu, pendelte sich jedoch bei etwa 1,5 Gew.-% ein. Auf der anderen Seite stieg das Gewicht des ungesinterten PTFE durch den gleichen Vorgang um bis zu etwa 5 Gew.-% an.

Figures and Tables: By a kind a approval of the authors.

Thermal Diffusion of Carbon Molecule into Polytetrafluoroethylene

1. Introduction

It has been recognized that polytetrafluoroethylene (PTFE) does not dissolve in any chemicals. This means that any chemicals do not interpenetrate into PTFE. But it was found out that carbon molecule which is one of the components of the smoke from the candle permeated into commercial grade PTFE by the thermal treatment after the deposition of the smoke on the sample [1].

This article studies the effect of the heat treatment temperature and the processing time on the amount of the carbon penetration after the smoke is deposited on the surface of PTFE. The amount of the interfused carbon in PTFE was evaluated by the measurement of the increase in the weight.

Also, the amount of the interfused carbon in PTFE was tried to measure by the measurement of the concentration of the radical which may exist in the end of the carbon molecule. The rate constant of the increase of the radical concentration was measured at various temperatures of the thermal treatment after the deposition of the smoke. The activation energy of the diffusion rate of the carbon into PTFE was measured.

Also, the effect of the heat treatment temperature on the amount of carbon penetration by the heat treatment after the deposition of soot on the non-sintered PTFE was studied. The article shows the fact that carbon molecules diffuse in PTFE.

candle. The sheet with the smoke was heated at a constant temperature of 350 °C, 360 °C, 370 °C and 380 °C to thermally interpenetrate the carbon molecular into PTFE. After the thermal treatment, the sample was cooled to room temperature and the carbon of the surface of PTFE was carefully wiped out. The amount of interfused carbon into PTFE was evaluated by the measurement of the weight.

2.3 Measurement of the property of the carbon interfused PTFE

The cross section of the carbon interfused PTFE was observed using Keyence digital microscope VHX-5000 to evaluate the thickness of the carbon interfused layer.

DSC curve of the sample of 0.05 mm was measured with a heating rate of 10 °C/min to estimate the changes in the crystalline structure caused by the interfusion of the carbon.

The electric volume resistivity of the sample of 0.05 mm thick was measured under the applied voltage of 1,000V.

The rate of the interfusion of carbon into PTFE was also evaluated by the measurement of the concentration of the radical which exist on the end of carbon molecule using ESR.

2. Experimental

2.1 Sample

The sintered sample used in this experiment was a commercial grade of polytetrafluoroethylene (PTFE) whose thickness was 0.05 mm, 0.2 mm and 0.5 mm. The non-sintered sample of 0.1 mm was kindly supplied by Nichias Corporation.

2.2 Deposition of carbon on PTFE and diffusion of carbon into PTFE

The surface of the sheet of PTFE was covered with the smoke from the wax

Author:

Masayuki Ito, Tokyo, Japan

Corresponding Author:

Masayuki Ito

Waseda University,

227-4 Nakamachi Kodaira

Tokyo 187-0042, Japan

E-Mail: masayuki@kurenai.waseda.jp

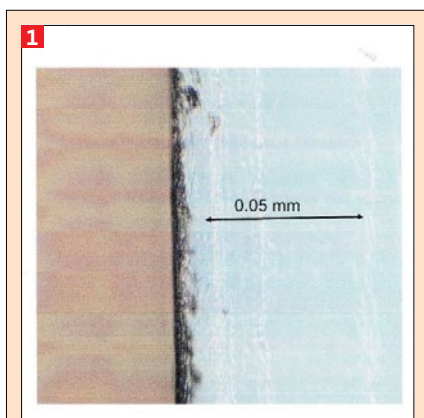


Figure 1: Cross-section of carbon diffused PTFE sheet of 0.5 mm.

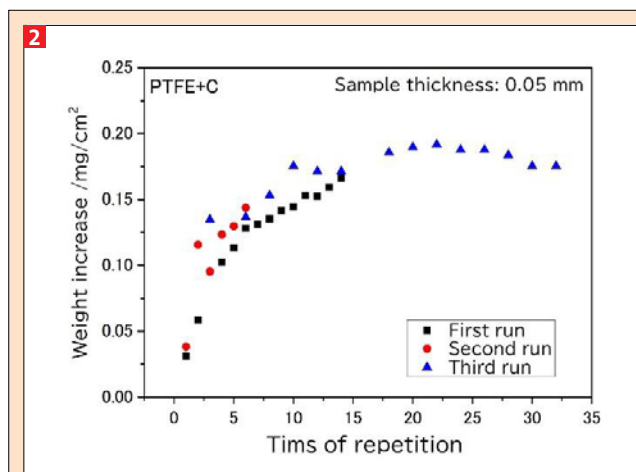


Figure 2: Relationship between the numbers of the operations and the increased weight.

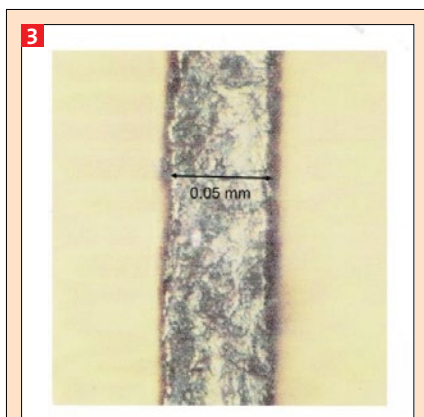


Figure 3: The cross section of the sample which had ten numbers of the repetition.

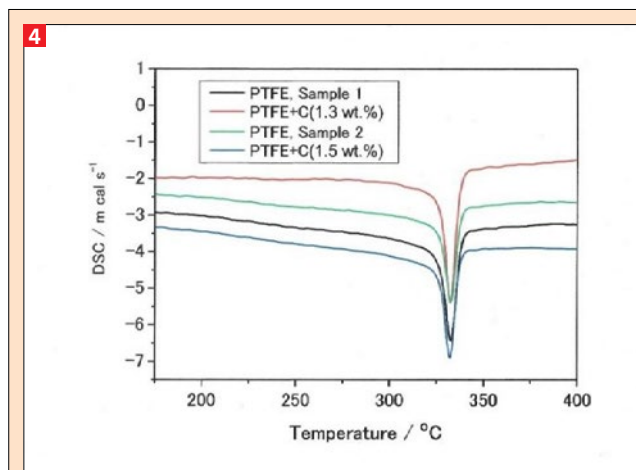


Figure 4: DSC curve of PTFE and that of the carbon diffused sample.

3. Result and discussion

3.1 Distribution of carbon in PTFE

Figure 1 shows the cross-section of PTFE sheet of 0.05mm which was heated 1 hour at 360°C after being deposited the smoke from the candle. The carbon was interpenetrated from the surface of PTFE to the inside by this operation. The thickness of the layer in which carbon was observed is from 5 micron to 10 micron. The distribution of the carbon in PTFE was not uniform. The deposited carbon molecules in PTFE may aggregate in the void space in PTFE during cooling the sample.

3.2 Increase of carbon by the repetition of the operation

The results mentioned above showed that the carbon molecule interpenetrated into PTFE by the thermal diffusion. The effect of repetition of the operation of the deposition of the soot and thermal treatment was studied. The size of PTFE

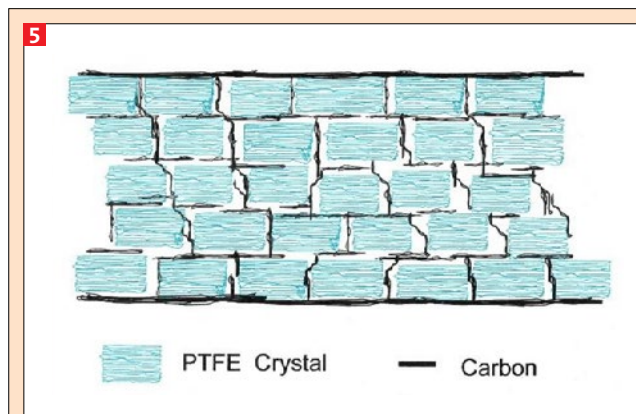


Figure 5: Schematic diagram of the carbon fused PTFE.

used in this experiment was 75x75x0.05mm (thickness); the soot from candle was deposited on the both side of the sheet. The sheet with the soot was heated one hour at 350°C in air and cooled to room temperature, which was the one unit of operation. Figure 2 shows the relationship between the numbers of the repetitive operations and the increased weight per unit area of the sample.

To investigate the reproducibility of the experimental data, the experiments on each of the different samples under the same conditions was studied. The weight of the samples was quickly increased by increasing the numbers of the repetitive operation but leveled off at about 0.18 mg/cm² which value is corresponded to 1.4 wt% when the thickness was 0.05 mm.

The cross section of the sample which had ten numbers of the repetition is shown in Figure 3.

The carbon was diffused to the center of the sheet but the distribution of the carbon was not uniform. In order to investigate how the carbon in the sample affects the crystal structure of PTFE, DSC curve of PTFE and that of the carbon diffused sample was measured and shows in Figure 4.

PTFE sample 1 and sample 2 are different parts of the same sheet of PTFE. The red and blue lines indicate the DSC curves of carbon diffusion samples with a carbon content of 1.3wt% and 1.5wt% respectively. The all of the DSC curve was almost the same, the result suggested that the carbon did not affect the crystal state of the sample.

The volume resistivity of original sample of 0.05 mm was $2.55 \times 10^{17} \Omega \cdot \text{cm}^2$. The value changed to $1.10 \times 10^{14} \Omega \cdot \text{cm}^2$ by the four times of the repetitions which brought about 1.0wt% of the weight increase. Since the electrical conductivity of the sample was increased obviously, it is clear that there are many places where carbon is connected continuously from the sample's surface to the back. Figure 5 is the schematic diagram of the carbon fused PTFE which is conceivable from the result mentioned above. The carbon may be located in the amorphous part of the PTFE.

3.3 Effect of duration of heating time after deposition of carbon

Figure 6 shows the effect of the duration of the thermal treatment after the carbon deposition on the weight increase of the sample whose thickness is 0.05 mm and 0.2 mm. The weight gain of both samples was leveled off at about 4 hours, despite the fact that soot remained sufficiently on the sample surface. This result shows that only a few parts of the carbon on the sample surface diffuse into PTFE.

3.4 Temperature dependence of the rate of the carbon diffusion into PTFE

Considering that the penetrated carbon molecule in PTFE was a low molecular weight, it is possible to measure the amount of the penetrated carbon using ESR because there is a radical at its both ends of the molecule.

The thickness of the sample used in this experiment was 0.5 mm. After the deposition of soot on both side of the surface, the sample was heated three hours in air.

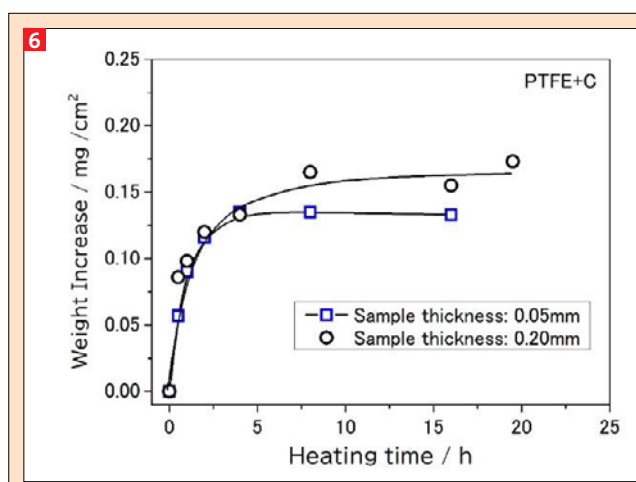


Figure 6: Effect of the duration of thermal treatment on the weight increase.

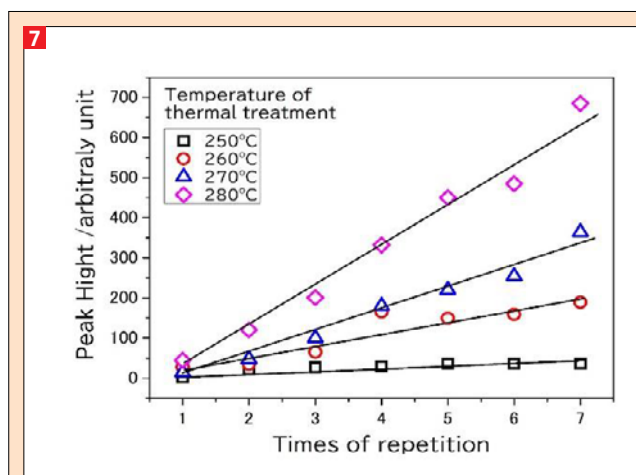


Figure 7: The ESR spectrum of the sample

The temperature of the thermal treatment was 350°C, 360°C, 370°C and 380°C. After heat treatment, the soot remaining on the surface was washed away and the sample for ESR measurement with a width of 10 mm and a length of 70 mm was cut out from the sheet. The ESR spectrum of the sample is shown in Figure 7. This is the typical spectrum of carbon radical.

The relationship between the times of the repetition and the height of peak is shown in Figure 8; this figure also shows the effect of the temperature of the thermal treatment on the increase in the amount of the radical. At any temperature, the radical concentration was proportional to the number of times of the penetration operation, that is, the total heat treatment time.

The slope of the line in figure 8 is considered to be proportional to the rate of the thermal diffusion of the carbon molecule into PTFE. Therefore, the activation energy of the rate of the thermal diffusion might be obtained by an Arrhenius

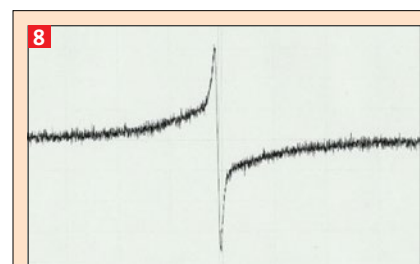


Figure 8: The relationship between the times of the repetition and peak height.

plot shown in Figure 9. The activation energy of the carbon diffusion into PTFE was 235 kJ/mol.

3.5 Diffusion of carbon into non-sintered PTFE

The size of non-sintered PTFE used was 80 mm x 80 mm x 0.1 mm (thickness). The effect of the duration of the heat treatment after the carbon deposition at 350°C on the weight increase is shown in Figure 10.

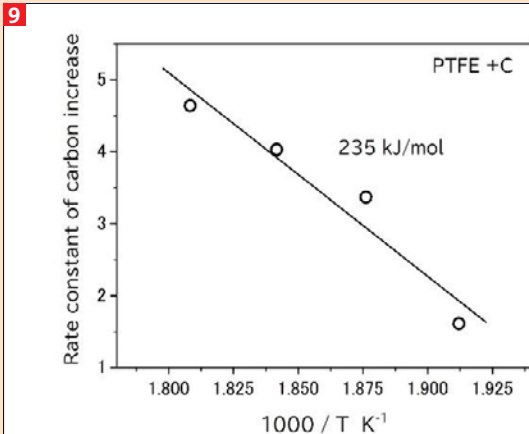


Figure 9:
Arrhenius plot of
the rate of the thermal
diffusion.

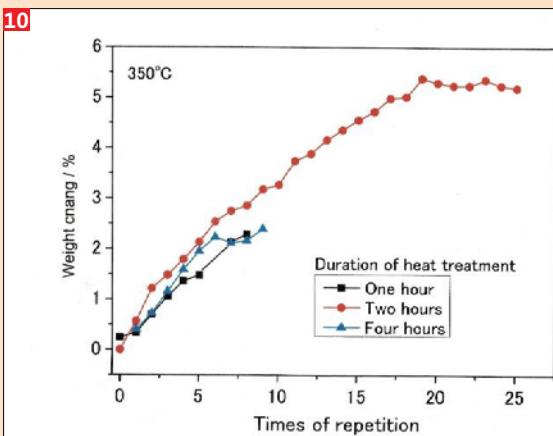


Figure 10:
Effect of the duration
of the heat treatment
at 350°C on weight
increase.

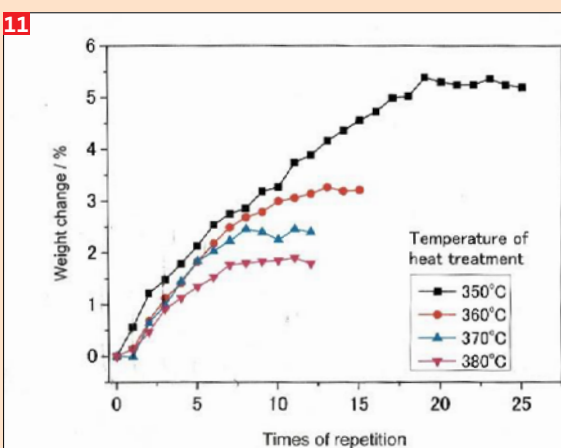


Figure 11:
Effect of temperature
of thermal treatment
on the weight increase.

The effect of the duration of the heat treatment on the weight change was very small. Unlike sintered PTFE, heat treatment of non-sintered PTFE after carbon deposition has resulted in a change in size. When the weight increased to 2%, the size was changed to about 75 mm x 50 mm x 1.25 mm (thickness). Figure 11 shows the effect of the temperature of thermal treatment after the deposition of the soot on the weight increase of the sample. The temperature of the treatment was 350°C, 360°C, 370°C and 380°C. The duration of the heat treatment was two hours.

The weight of the sample increased in proportion to the number of repetitions up to a certain degree, but with the number of repetitions increased, the weight change became saturated. The weight of the saturated state depended on the temperature of heat treatment. The higher the temperature, the lower the saturated weight as shown in the figure. These phenomena can be considered as follows.

It is believed, that there are many non-crystalline structures with voids between crystalline aggregates in non-sintered PTFE. Relatively low molecular weight carbon in candle smoke penetrates into the sample and stays in the void. The crystallization and the aggregation of PTFE molecules may occur slightly even at normal pressure due to the heat treatment of the sample. Some carbon molecules are released to the surface along with the crystallization. The crystallization of PTFE is faster at the higher temperature. Therefore, the residual amount of carbon molecules remaining in the sample may decrease along with increasing the temperature of the heat treatment. ■

REFERENCE

- [1] M. Ito, Patent of Japan 5292536 (June 21, 2013)

A Rohstoffe und Compunds

Elastomere

Biesterfeld Performance
Rubber GmbH
Ferdinandstraße 41
20095 Hamburg
rubber@biesterfeld.com
www.biesterfeld.com



Kabel- und Kautschukcompunds

melos

Sports & Recreational
Components

Industrial Compounds

Melos GmbH
Bismarckstrasse 4 - 10
49324 Melle | Germany
Phone +49 54 22 94 47-0
Fax +49 54 22 59 81
info@melos-gmbh.com
www.melos.com

Kautschuk-Mischungen



ARTEMIS Kautschuk- und
Kunststoff-Technik GmbH
Rothwiese 4
30559 Hannover
Telefon +49(0)511-959280
Telefax +49(0)511-9592855
info@artemis-kautschuk.de
www.artemis-kautschuk.de

Compounds
rubber solutions

Compounds AG · Barzloostr. 1
CH - 8330 Pfäffikon/ZH
Telefon: +41 44 953 34 00
info@compounds.ch

www.compounds.ch



Manfred Hoffmann GmbH & Co. KG
Gummitechnik
Marie-Curie-Straße 2,
Postfach 12 29
42477 Radevormwald
Telefon (0 21 95) 70 73,
Fax 4 06 97



POLYMER-TECHNIK ELBE GMBH

Kautschukmischungen

www.polymertechnik.com

(03491) 659-250
info@polymertechnik.com
Heuweg 5 · 06886 Lutherstadt Wittenberg



WAGU Gummitechnik GmbH

Friedrich-Harkort-Str. 17
D-59581 Warstein-Belecke
info@wagu-rubber.com
www.wagu-rubber.com
Fon (+49) 029 02-97 39-0,
Fax (+49) 029 02-97 39-79

Kautschuk- und Silikon-Mischungen



Gummiwerk KRAIBURG GmbH & Co. KG

Gummiwerk KRAIBURG GmbH & Co. KG
Teplitzer Straße 20
84478 Waldkraiburg
Telefon: 0 86 38 / 61-0
Telefax: 0 86 38 / 61-310
info@kraiburg-rubber-compounds.com
www.kraiburg-rubber-compounds.com



Elastomercompounds &
Gummiartikel
Grossholzstrasse 20
CH - 8253 Diessenhofen
Telefon +41 52 646 08 00
verkauf@plastigum.ch
www.plastigum.ch



EFROSIL und EFROFLUOR hellvulkanisierbare Silikon- und
Fluorsilikoncompounds für höchste technologische Ansprüche

Silcomp Silikoncompounding GmbH

Heuweg 5a
Tel.: 03491/559460
servicecenter@silcomp.de
06886 Lutherstadt Wittenberg
Fax: 03491/559461

www.silcomp.de

Silikonkautschuk Mischungen



• SILICONE
• ELASTOMER
• FLUOR

KOMPETENZ IN
KAUTSCHUK
rado.de
sales@rado.de
Tel.: +49 2195 674-0

Thermoplastische Elastomere

ultrapolymers
a Spirit of Partnership

Ultrapolymers Deutschland GmbH

Unterer Talweg 46
D-86179 Augsburg
Tel. +49 (0) 8 21 / 2 72 33-0
Fax +49 (0) 8 21 / 2 72 33-80
E-Mail info@ultrapolymers.de
www.ultrapolymers.com

B

Hilfs- und Zusatzstoffe

Beschichtete technische Textilien

SI-KA-TEC
engineering coating GmbH

SI-KA-TEC GmbH®

Ascher Straße 26
95100 Selb
Tel: ++49 (0) 9287-9963-0
Fax: ++49 (0) 9287-9963-99
office@si-ka-tec.de
www.si-ka-tec.de
zertifiziert nach DIN EN ISO 9001:2008

Dry-Liquids

Sourcing | Customizing | Manufacturing

LUVOMAXX
SOLUTIONS FOR RUBBER

Lehmann & Voss & Co. KG
20354 Hamburg
Telefon 040/44 19 70
Fax 040/44 19 73 47
luvomaxx@lehvoss.de
www.luvomaxx.de

Füllstoffe



Alpha Calcit Füllstoff
Gesellschaft mbH & Co. KG
P.O. Box 50 11 06,
D-50971 Cologne
Phone +49 2236 89 14-0
Fax +49 2236 40644
Mail crm@alpha-calcit.de



D-50226 Frechen

Tel. 02234/101-437

sales@hpfminerals.com

Füllstoffe mineral

FLEXILIS
innovative solutions

Flexilis GmbH

Silikate & Silikatgemische
Untere Viaduktgasse 55/7
AT – 1030 Vienna
Mail: office@flexilis.eu
Tel.: +43-1-522 36 40
Web: www.flexilis.eu



D-50226 Frechen

Tel. 02234/101-437

sales@hpfminerals.com

Prozessöle

ERGON
UNITED BY SERVICE. DRIVEN BY SOLUTIONS.

Ergon International Inc.
Drève Richelle 161, Bât. C, Box 9
1410 Waterloo - Belgium
Tel +32 23512375
Orders.Int@ergon.com

Glimmerpuder

Mahlwerk Neubauer –
Friedrich Geffers GmbH, Hamburg
Tel.: 040-23537750
Fax: 040-235377529

Hochleistungsfüllstoffe

HPF The Mineral Engineers
A DIVISION OF QUANTUMERIE GROUP

D-50226 Frechen
Tel. 02234/101-437
sales@hpfminerals.com

Kautschukchemikalien

Sourcing | Customizing | Manufacturing

LUVOMAXX®
SOLUTIONS FOR RUBBER

Lehmann & Voss & Co. KG
20354 Hamburg
Telefon 040/44 19 70
Fax 040/44 19 73 47
luvomaxx@lehvoss.de
www.luvomaxx.de

Ruße

Sourcing | Customizing | Manufacturing

LUVOMAXX®
SOLUTIONS FOR RUBBER

Lehmann & Voss & Co. KG
20354 Hamburg
Telefon 040/44 19 70
Fax 040/44 19 73 47
luvomaxx@lehvoss.de
www.luvomaxx.de

Silane

Deolink®-Silanpräparationen
Deolink®-Flüssigsilane

D.O.G.
ADD EFFICIENCY

DOG Deutsche Oelfabrik
Ges.f.chem.Erz.mbH&Co.KG

Ellerholzdam 50 Tel. + 49 40 311 805-0
20457 Hamburg Fax + 49 40 311 805-88
www.dog-chemie.de info@dog-chemie.de

Trennmittel / Formen-
beschichtungsmittel

BARBE

PROMOL®

MISCHUNGSTRENNMITTEL

FORMENTRENNMITTEL

GLEITMITTEL

HANS W. BARBE
CHEMISCHE ERZEUGNISSE GMBH

Alte Schmelze 2 · 65201 Wiesbaden
T +49 611 182 92-0 · info@barbe.de

Schill+Seilacher
struktol

SCHILL + SEILACHER
STRUKTOL
GmbH

Moorfleeter Str. 28
22113 Hamburg
Telefon (0 40) 7 33 62-0
Telefax 7 33 62-1 94
Internet: struktol.de
e-mail: info@struktol.de

Verarbeitungs-Wirkstoffe

Deolink®-Silanpräparationen
Deolink®-Flüssigsilane

D.O.G.
ADD EFFICIENCY

DOG Deutsche Oelfabrik
Ges.f.chem.Erz.mbH&Co.KG

Ellerholzdam 50 Tel. + 49 40 311 805-0
20457 Hamburg Fax + 49 40 311 805-88
www.dog-chemie.de info@dog-chemie.de

FLEXILIS
innovative solutions

Flexilis GmbH

Homogenisatoren & Hartbitumen

Untere Viaduktgasse 55/7

AT – 1030 Vienna

Mail: office@flexilis.eu

Tel.: +43-1-522 36 40

Web: www.flexilis.eu

GREEN PLANET ACT
INITIATIVE FOR SUSTAINABLE INDUSTRY

Schill+Seilacher
struktol

SCHILL + SEILACHER
STRUKTOL
GmbH

Moorfleeter Str. 28
22113 Hamburg
Telefon (0 40) 7 33 62-0
Telefax 7 33 62-1 94
Internet: struktol.de
e-mail: info@struktol.de

Halb- und
Fertig-
erzeugnisse

Gummiformteile aller Art

LAYHER

Flexible Technologie

Layher AG

Kalkwerkstraße 23
71737 Kirchberg/Murr

Telefon 071 44/32 04
Telefax 071 44/343 07

e-mail: info@layher-ag.de

www.layher-ag.de

Wilh. Kerspe GmbH + Co. KG
Gummi- und Kunststoffwerk
51688 Wipperfürth – Ohl

PLASTIGUM

Elastomercompounds &
Gummiformartikel

Grossholzstrasse 20

CH - 8253 Diessenhofen

Telefon +41 52 646 08 00

verkauf@plastigum.ch

www.plastigum.ch

D Verfahren,
Maschinen und
Werkzeuge

Compoundiertechnologie



BUSS

excellence in compounding

Buss AG
Pratteln/Schweiz
Tel. 0041 61 825 66 00
Mail info@busscorp.com
Web www.busscorp.com

Getriebe

BRAUER
Maschinentechnik AG

Getriebeservice

- » Instandhaltung und Optimierung aller Fabrikate und Bauformen
- » Vor-Ort-Inspektionen und Diagnose
- » Sonderkonstruktionen
- » von 100kg bis hin zu 100t Stückgewicht

D-46395 Bocholt · Tel.: +49 2871/70 33
www.brauer-getriebe.de

Heizelement-
Schweißmaschinen

KVT®
BIELEFELD

KVT Bielefeld GmbH, Rabenhof 18 A
Tel. (0521) 932070, Fax 93207 11

Hydraulische Pressen

WICKERT
hydraulic presses

Wickert Maschinenbau GmbH

Wollmersheimer Höhe 2, 76829 Landau

Tel.: 06341/9343-0, Fax: 06341/9343-30

Internet: www.wickert-presstech.de

E-Mail: info@wickert-presstech.de

**Kunststoff-
Schweißmaschinen**

KVT Bielefeld GmbH, Rabenhof 18 A
Tel. (05 21) 93 20 70, Fax 93 20 7 11

Laborwalzwerke

SERVITEC GmbH
14641 Wustermark
www.servitecberlin.de

**Ultraschall-
Schweißmaschinen**

KVT Bielefeld GmbH, Rabenhof 18 A
Tel. (05 21) 93 20 70, Fax 93 20 7 11

**Meß-, Steuer-
und Prüfgeräte****Automatisierungs- und
Steuersysteme
MTS-Systeme**

Automatisierungs- und Steuerungssysteme,
Rohstoffrückverfolgung, Qualitätssicherung

CT Datentechnik GmbH
Eschenstr. 2
31582 Nienburg/Weser

Tel.: +49 5021 90433-0
Web: www.ctdatentechnik.de
E-Mail: mbox@ctdatentechnik.de

**Laborpressen**

SERVITEC GmbH
14641 Wustermark
www.servitecberlin.de

Laser-Schweißmaschinen

KVT Bielefeld GmbH, Rabenhof 18 A
Tel. (05 21) 93 20 70, Fax 93 20 7 11

**Vibrations-Reib-
Schweißmaschinen**

KVT Bielefeld GmbH, Rabenhof 18 A
Tel. (05 21) 93 20 70, Fax 93 20 7 11

Walzen

drink & schlössers
walzen
technik

Mühlenweg 21-37 · D-47839 Krefeld-Hüls
Tel. 02151/7 46 69-0 · FAX 02151/7 46 69-10
Internet: http://www.ds-walzen.de
e-mail: info@ds-walzen.de

WICKERT

hydraulic presses

Wickert Maschinenbau GmbH
Wollmersheimer Höhe 2, 76829 Landau
Tel.: 0 63 41/93 43-0, Fax: 0 63 41/93 43-30
Internet: www.wickert-presstech.de
E-Mail: info@wickert-presstech.de



BIOPOLYMER
Processing & Moulding

SAVE THE DATE!

16.-17. Juni 2025
in Halle (Saale)

**Die Zukunft der
Kunststoffwirtschaft**

Internationaler Kongress für
Verarbeiter und Anwender



Verleihung des BIOPOLYMER Innovation Award 2025

Eine Veranstaltung von **POLYKUM** und **PLASTVERARBEITER**

VORSCHAU

KGK KAUTSCHUK GUMMI KUNSTSTOFFE 3/25

■ Jacques W.M. Noordermeer,
Nieuwstadt, Dennis Nahuijsen,
Wijk bij Duurstede, the Netherlands,
Marc A. Masen, London UK
**Implications of Pending ECHA PFAS
Restriction proposal for elastomeric
rotary Propeller/Screw Seals for
Marine Applications**

■ Raffaele Bernardo, Marjan Hemstede
van Urk, Dave Hardy, the Netherlands,
Kevin Kulbaba, Canada
**Green Elastomers and Compounding
Solutions: Bringing Sustainability into
the Rubber World**

■ A. H. Hassan, R. Sobhy, N. A. M. Eid,
M. K. El Mansy, Egypt
**DC Conductivity and Tensile Behavior
Investigation on Carbon black/Acrylo-
nitrile – Butadiene Rubber Nano Com-
posite for Antistatic and Electromag-
netic Shielding Applications**

Impressum



www.kgk-rubberpoint.de
ISSN 0948-3276

Geschäftsführer:

Matthias Bauer, Günter Schürger

Herausgeber

Prof. Dr. Ulrich Giese, DIK Hannover

KGK im Internet:

www.kgk-rubberpoint.de

So erreichen Sie die Redaktion:

Chefredaktion:

Stefan Lenz (v.i.S.d.P.) – stefan.lenz@win-verlag.de,
Tel.: +49 (89) 3866617-19

Leitende Redakteurin:

Simone Fischer – simone.fischer@win-verlag.de,
Tel.: +49 (89) 3866617-15

Redaktionsassistent:

Diana Bönning – diana.boenning@huethig-medien.de
Tel.: +49 (6221) 489-272

So erreichen Sie die Anzeigenabteilung:

Sales Manager:

Klaus-Dieter Block – klaus-dieter.block@win-verlag.de,
Tel.: +49 (89) 3866617-27

Sales Consultant:

Gabriele Leyhe – gabriele.leyhe@win-verlag.de,
Tel.: +49 (89) 3866617-24

Anzeigendisposition:

Auftragsmanagement@win-verlag.de

Chris Kerler – chris.kerler@win-verlag.de,
Tel.: +49 (89) 3866617-32

Abonentenservice und Vertrieb:

Tel.: +49 (89) 3866617-46,
www.kgk-rubberpoint.de/hilfe oder E-Mail an
abovertrieb@win-verlag.de mit Betreff „KGK“
Gerne mit Angabe Ihrer Kundennummer vom
Adressetikett

Beirat:

Prof. Dr. Anke Blume, University of Twente, Enschede,
Overijssel (Niederlande)

Prof. Dr. Maurizio Galimberti, Politecnico di Milano,
Milano (Italien)

Prof. Dr. Ivan Hudec, Slovak University, Bratislava
(Slowakei)

Prof. Dr. Jörn Ihlemann, TU Chemnitz, Chemnitz

Prof. Dr. Seiichi Kawahara, Nagaoka University,
Niigata-Ken (Japan)

Dr. Ernst Osen, Freudenberg Sealing Technologies,
Weinheim

Dr. Georges Thielen, Colmar-Berg (Luxemburg)

Prof. Dr. Liqun Zhang, Beijing University, Beijing (China)

Organ:

Deutsche Kautschuk-Gesellschaft e.V.
Normenausschuss im DIN Anzeigen

Artredaktion/Titelgestaltung/Layout:

JournalMedia GmbH, München

Druck:

QUBUS media GmbH, Beckstraße 10, 30457 Hannover

Titelbild: SERHII – stock.adobe.com

Produktion/Herstellung:

Jens Einloft – jens.einloft@win-verlag.de,
Tel.: +49 (89) 3866617-36

Anschrift Anzeigen, Vertrieb und alle Verantwortlichen:

WIN-Verlag GmbH & Co. KG
Chiemgaustr. 148 81549 München
Tel.: +49 (89) 3866617-0

Verlagsleitung:

Martina Summer – martina.summer@win-verlag.de,
Tel.: +49 (89) 3866617-31

Objektleitung:

Martina Summer – martina.summer@win-verlag.de,
Tel.: +49 (89) 3866617-31

Zentrale Anlaufstelle für Fragen zur Produktsicherheit

Martina Summer – martina.summer@win-verlag.de,
Tel.: +49 (89) 3866617-31

Bezugspreise:

Bezugsbedingungen und -preise (inkl. ges. MwSt.) 2025:

Inland € 420,00 € zzgl. € 10,50 Versand = € 430,50

Ausland € 420,00 € zzgl. € 21,00 Versand = € 441,00

Einzelverkaufspreis € 72,00 inkl. ges. MwSt. & zzgl.
Versand

Der Studentenrabatt beträgt 35 %

Kündigungsfrist:

jederzeit mit einer Frist von einem (1) Monat

Erscheinungsweise:

6 x jährlich

Haftung für die Richtigkeit der Veröffentlichungen kann
trotz Prüfung durch die Redaktion vom Herausgeber
nicht übernommen werden. Honorierte Artikel gehen in
das Verfügungsrecht des Verlags über. Mit Übergabe
der Manuskripte und Abbildungen an den Verlag erteilt
der Verfasser dem Verlag das Exklusivrecht zur
Veröffentlichung. Für unverlangt eingesendete
Manuskripte, Fotos und Abbildungen keine Gewähr.

Copyright © 2025 für alle Beiträge bei der WIN-Verlag
GmbH & Co. KG.

Kein Teil dieser Zeitschrift darf ohne schriftliche
Genehmigung des Verlages vervielfältigt oder verbreitet
werden. Unter dieses Verbot fällt der Nachdruck, die
gewerbliche Vervielfältigung per Kopie, die Aufnahme
in elektronische Datenbanken und die Vervielfältigung
auf CD-ROM und allen anderen elektronischen
Datenträgern. Dieses Magazin ist umweltfreundlich auf
chlorfrei gebleichtem Papier gedruckt.

KGK: 03/25 (ET: 18.06.2025)

ISSN 0948-3276

Unsere Papiere sind PEFC zertifiziert

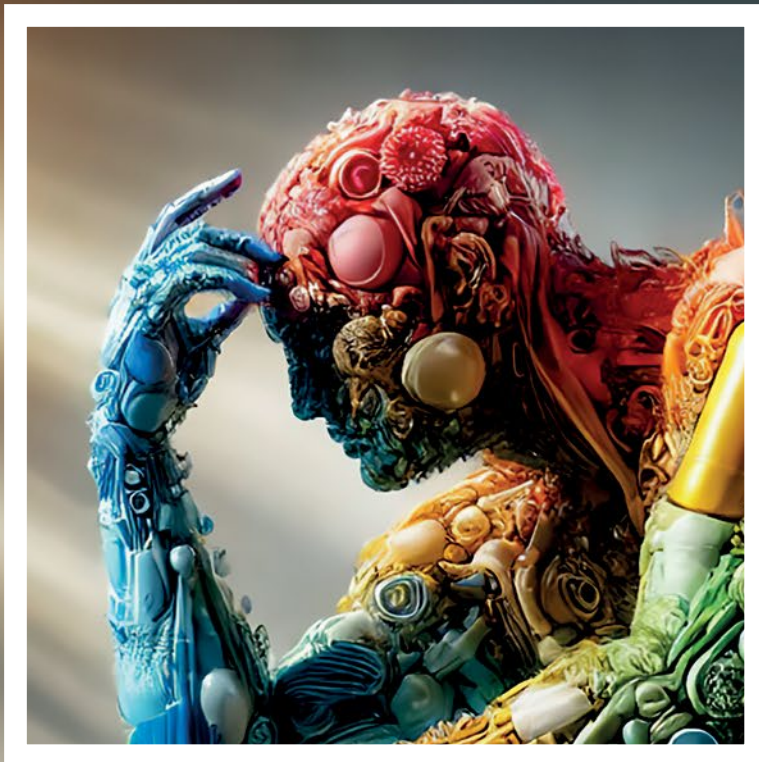
Wir drucken mit mineralölfreien Druckfarben

Außerdem erscheinen bei der

WIN-Verlag GmbH & Co. KG:

Magazine: AUTOCAD Magazin, Bauen Aktuell,
Digital Business, e-commerce Magazin,
DIGITAL ENGINEERING Magazin,
DIGITAL MANUFACTURING, PlastXnow, Plastverarbeiter
r.energy, DIGITAL PROCESS INDUSTRY

IM FOKUS

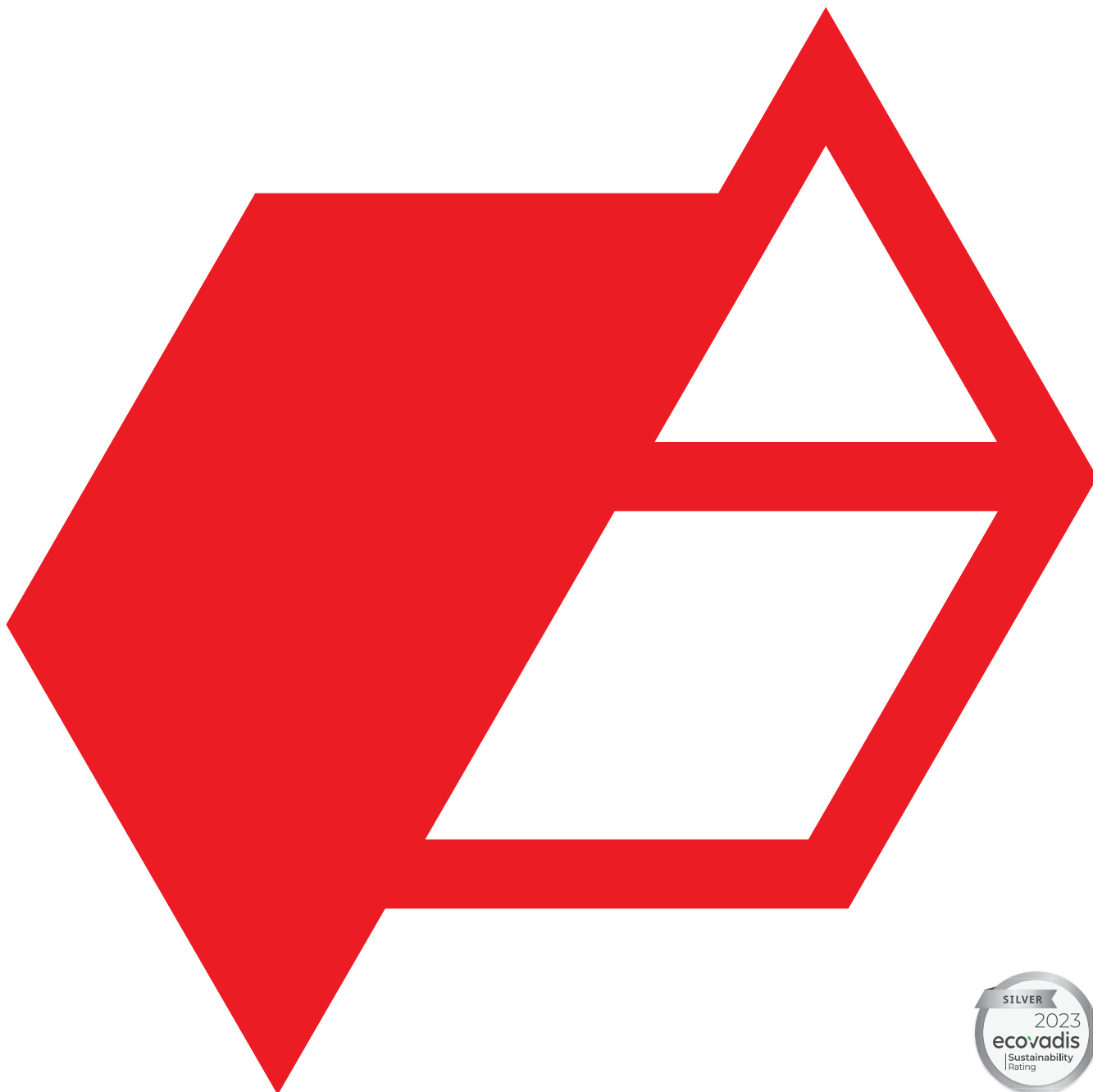


*Kunststofflösungen von heute für die
Herausforderungen von morgen*

PLASTX
NOW

Ihre Vision. Unsere Lösungen. Informieren Sie sich jetzt

www.plastXnow.de



Wir schaffen Verbindungen, die ewig halten. Sogar in den Tiefen des Meeres.



Sillitín
Z 86



Aktisil
PF 216



Aktisil
VM 56/89



Aktisil
Q

Aktisil VM 56

Mit dem Füllstoff **Aktisil VM 56** haben wir die Widerstandsfähigkeit bei Kabelummantelungen erhöht. Dadurch können Kabel auf Bohrinseln nun noch tiefer in das Meer abgelassen werden und halten noch viel länger. Das schont die Umwelt. Für eine bessere Zukunft. Lernen Sie auch unsere **Sillitín**-Produkte kennen, die sich hervorragend für den Einsatz bei Kabelummantelungen eignen. Für eine Welt, die länger hält. Made in Germany.

Mehr Infos unter hoffmann-mineral.de



BESUCHEN SIE UNS

K 2025, Düsseldorf
8.–15. Oktober 2025, Halle 6, Stand B51

**HOFFMANN
MINERAL®**
Wir geben Stoff für gute Ideen