

Thermografie im industriellen Spritzguss

Dr. Dirk Kilian, TBK

@ Eugendorf, 20.09.2024

- profil -

Dr.-Ing. Dirk Kilian

Technische Beratung und Service

- Promotion in Physikalischer Chemie 1999
- Über 20 Jahre Erfahrung in der Polymerindustrie
- Selbständig seit Mai 2022
- Expertise in Polymerisation und Monomeren
- Technologie vom Labor bis zum Endprodukt
- Kompetenz in Qualität and Produktverantwortung
- Elastomere, Gummi, Kunststoffe und Hybridmaterialien
- Unterstützung bei Regulatorien und Registrierung



Angebot TBK

Unterstützung bei allen Schritten der Herstellung von Gummi- und Kunststoffprodukten

Beratungsthemen

- Rohstoffe
 - Auswahl und Beschaffung
 - Polymerherstellung, Compounding, Formgebung
 - Mischungsentwicklung
- Spezifikationen
 - Verfahrenstechnik, Messverfahren, Labortechnik
- Verfahrensoptimierung
 - Umweltverträglichkeit, Wirtschaftlichkeit
 - Energieeffizienz, Nachhaltigkeit, Scale-Up
- Marktdaten
 - Ermittlung, Markt Research
- Marketing und Vertrieb
 - Vorträge, Seminare, Publikation
- Gutachten

Kunden

- Elastomerverarbeiter
- Kunststoffverarbeiter
- Compounder
 - Kunststoff – und Elastomermischbetriebe
- Polymerhersteller
- Laborgerätehersteller
- Chemikalienlieferanten
- Seminaranbieter, Bildungsträger, Forschungsinstitute
- Zivilgerichte

3

Arbeitsverständnis

Grundprinzipien

- **„Offenes Visier“.**
Es gibt keine versteckten Vor-/Nachteile oder Motivationen durch Dritte. Andere Beweggründe außerhalb eines Auftrages lehne ich ab.
- **„Authentisch“.**
Meine Beratung fußt auf eigenen Erfahrungen und Analysen, falls nötig durch Unterstützung aus meinem Netzwerk – ohne Nennung des Kunden, es sei denn es ist nötig und zuvor abgestimmt.
- **„Reflexion“.**
Jeder Schritt wird auf seine Wirkung geprüft
- **„Machen“.**
Jede Position im Team ist wichtig. Das Machen bedeutet für mich sowohl mitmachen, vormachen und nachmachen
- **„KISS“.** (keep it stupid simple)
Es ist nicht notwendig etwas in aller Breite theoretisch und praktisch zu bearbeiten. Es genügt, wenn es funktioniert. Dann aber im Detail zu aller Zufriedenheit.

4

Haftungsauschuß

Disclaimer



Alle verwendeten Quellen und Bilder sind von mir nach bestem Wissen und Gewissen referenziert. Für die weitere Verwendung übernehme ich **keine** Haftung und verweise auf die Originalquellen.

Urheberrecht / Leistungsschutzrecht

Die in dieser Präsentation veröffentlichten Inhalte unterliegen dem deutschen Urheberrecht und Leistungsschutzrecht. Alle vom deutschen Urheber- und Leistungsschutzrecht nicht zugelassene Verwertung bedarf der vorherigen schriftlichen Zustimmung des Anbieters oder jeweiligen Rechteinhabers. Dies gilt vor allem für Vervielfältigung, Bearbeitung, Übersetzung, Einspeicherung, Verarbeitung bzw. Wiedergabe von Inhalten in Datenbanken oder anderen elektronischen Medien und Systemen. Dabei sind Inhalte und Rechte Dritter als solche gekennzeichnet.

Das unerlaubte Kopieren der Webseiteninhalte oder der kompletten Webseite ist nicht gestattet und strafbar. Lediglich die Herstellung von Kopien und Downloads für den persönlichen, privaten und nicht kommerziellen Gebrauch ist erlaubt.

Worum geht's ?

Thermographie und Spritzguss



Das Spritzgussverfahren ist eine der wichtigsten Verarbeitungsmethoden für die Herstellung von Gebrauchsgegenständen, Funktionsteilen und Verpackungen aus polymeren Werkstoffen. Dabei werden unter Druck, Temperatur und Scherung die polymeren Werkstoffe mehr oder weniger flüssig in Form gebracht. Bei diesem Prozess verteilt sich die Wärme im Formkörper nicht gleichmäßig und führt zu Effekten die nicht immer erwünscht sind. Um die Wärmeverteilungen zu analysieren, zu bewerten und letztlich den Prozess anzupassen wurde die Thermografie eingesetzt. Neben der Einführung in die Eigenschaften der verschiedenen Werkstoffe

und deren Bezug zur Verarbeitung werden im Vortrag Grundlagen zur Verarbeitung und Verbesserung derselben mittels Thermografie vermittelt.

Es gibt grundsätzlich zwei Arten von polymeren Werkstoffen die im industriellen Spritzguss verarbeitet werden. Diese sind zum einen die sogenannten Thermoplaste, die unter Erwärmung erweichen. Zum anderen sind es die Duroplaste und im Bereich der Elastomere die Kautschuk Vulkanisate, allgemein als Gummi bezeichnet, die unter Erwärmung eine Vernetzung ausführen und somit hernach nicht mehr verformbar sind. Thermoplaste werden somit heiß eingespritzt, um unter Abkühlung im Werkzeug zu erstarren und ihre Form zu behalten. Duroplaste und Vulkanisate werden kühler eingespritzt und im Werkzeug unter Wärmeeinwirkung vernetzt, noch heiß entformt. (Bild 1). Eine Besonderheit sind Duroplaste, die unter chemischer Vernetzung auch kalt verarbeitet werden können und hier nicht behandelt werden.

Je nach Komplexität des Formteils, mit und ohne sogenannte Hinterschnitte, wird der Entformungsprozess dynamisch angepasst und die flexiblen Eigenschaften des Werkstoffs genutzt, um vor der endgültigen Ausbildung der Festigkeit zu entformen. Für die gewünschte Form kann es auch notwendig sein Entlastungskavitäten im Werkzeug einzurichten, die zu Überständen am Formteil und deren Nachbearbeitung führen.

Die für den Spritzgussprozess wichtigen Fließeigenschaften der Werkstoffe unterliegen den physikalischen Gesetzen und werden heutzutage mittels ausgefeilter Simulationsprogramme berechnet. Dabei treten unter anderem friktionsbedingte Erwärmungen an Engstellen im Werkzeug auf, die zur Temperaturverteilung am Ende des Formgebungsprozesses beitragen. Analog treten des gleichen an verdickten Fließwegen im Werkzeug Abkühlungen auf.

Für einige hochbelastete Formteile werden polymere Werkstoffe mit anisotropen Füllstoffen, wie Fasern oder Mineralien verwendet, bei denen diese Füllstoffe als homogener Festigkeitsträger dienen und deren Ausrichtung im Endzustand des Formteils zu dessen Funktion beiträgt. Hier treten weitere Effekte auf, für die die Thermografie als Messmittel für die Qualitätssicherung eingesetzt werden kann.

Übersicht

Worum geht es ?

Spritzguss & Thermographie

- Grundlagen
- Verarbeitung von Thermoplasten und Duroplasten mittels Thermoforming
- Eigenschaften der Werkstoffe und der Werkzeuge
- Spritzguss von Aerosoldichtungen
- Grenzen der Verfahren und Produkte
- Thermographie als Messmittel

Kurzfassung

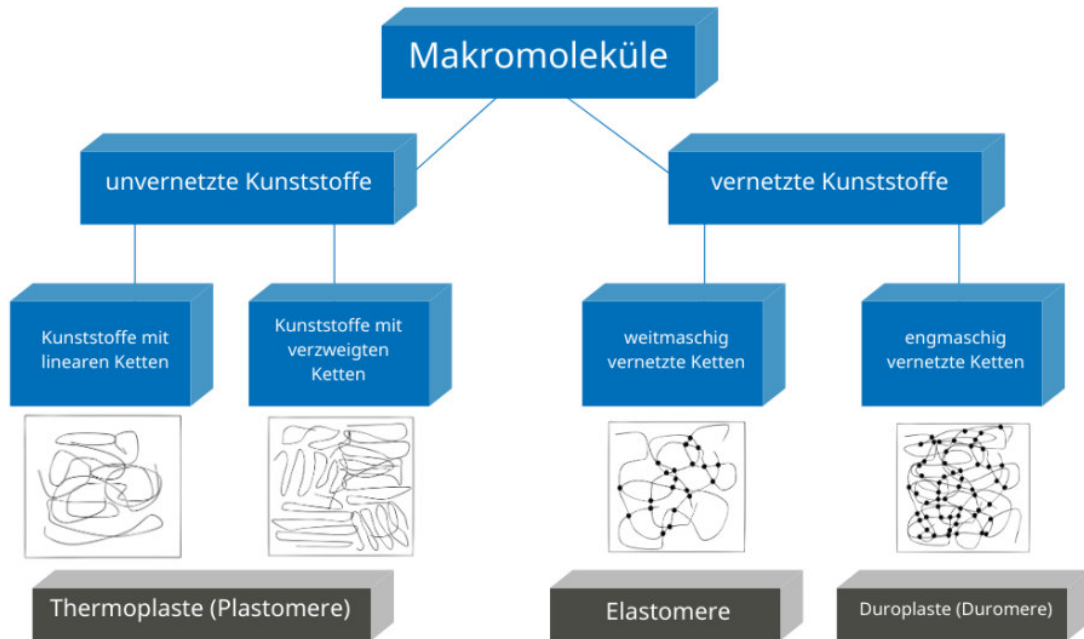
- Eigenschaften von Polymeren
- Spritzgusstechnik
- Werkzeuge sind Formen in Automaten
- Formgebungstoleranzen
- Temperatur und Druckbereiche begrenzt
- Thermographie in der Prozessentwicklung, -kontrolle und zur Qualitätskontrolle

Grundlagen

- Polymere Werkstoffe
 - Thermoplaste, Duroplaste und Elastomere
 - Einteilung der Polymerwerkstoffe
 - Vulkanisation
- Verarbeitungstechniken
 - Spritzguss
 - Extrusion
 - Blasformen
 - Transferspritzguss
 - Kalandrieren

- Spritzgussverfahren
 - Werkstoffe und deren Ablage
 - Werkzeuge = Formen
 - Automaten
 - Aufbau
 - Prozessablauf
 - Kenndaten
- Einflußfaktoren
 - der Materialien
 - der Prozessschritte
 - der Temperatur
 - des Druckes
 - der Einspritzgeschwindigkeit

Polymere Werkstoffe



Einteilung der Polymerwerkstoffe

Elastomere	Duroplaste	Thermoplastische Elastomere	Thermoplaste
Entropieelastisch	Energieelastisch	Vorwiegend entropieelastisch	Vorwiegend energieelastisch
Chemisch vernetzt	Chemisch vernetzt	Physikalisch vernetzt	Nicht vernetzt
Kein Fließbereich bis zur Zersetzung	Kein Fließbereich bis zur Zersetzung	Schmelzbereich	Schmelzbereich
Glasübergangstemperatur $T_g, T_R < 0\text{ °C}$	Kein T_R bzw. T_g	2 Übergangsbereiche $T_R < 0\text{ °C}, T_m \gg 0\text{ °C}$	Kälterichtwert (T_R) bzw. Kristallit-schmelzpunkt (T_m) $T_R, T_m \gg 0\text{ °C}$
Zugverformungsrest (ZVR) < 2% (in Anlehnung an ISO 2285, Dehnung 100% bei RT, Lagerungsdauer eine Minute).	Nicht bestimmbar	ZVR < 50%	ZVR > 50%

T_g Glasübergangstemperatur
 T_R Kälterichtwert
 T_m Schmelztemperatur

Quelle: Röthemeyer, Sommer; „Kautschuktechnologie“, Carl Hanser Verlag, München 2013

Einteilung der Polymerwerkstoffe

Erweichungsverhalten Thermoplaste – Duroplaste, Elastomere

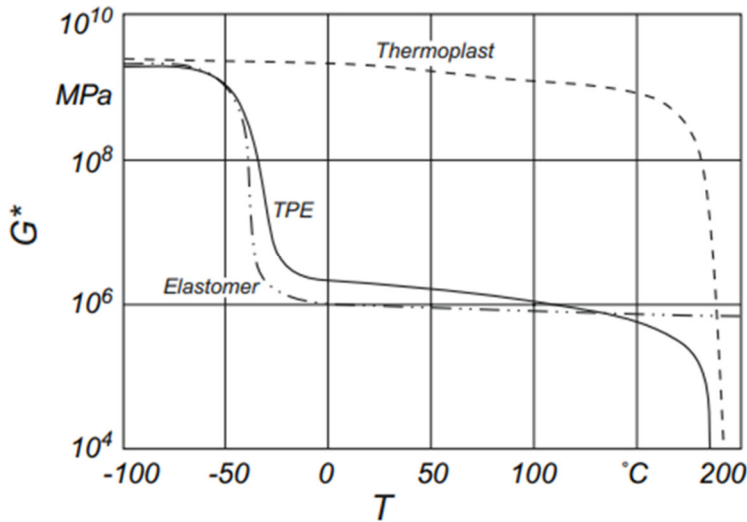


Bild 14.1

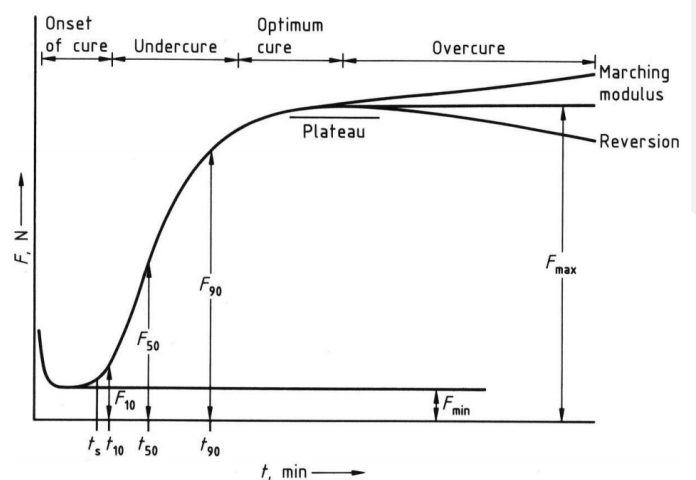
Temperaturabhängigkeit des komplexen Schubmoduls G^* für polymere Werkstoffe (nach [14.1])

Quelle: Röthemeyer, Sommer, „Kautschuktechnologie“, Carl Hanser Verlag, München 2013

Vulkanisation

Bei der Vulkanisation werden bei hohen Temperaturen chemische Verbindungen zwischen den einzelnen Polymerketten aufgebaut. Dadurch erhöhen sich die Viskosität und die Rückstellkräfte in der Matrix. Mit einem Vulka-Rheometer wird die Kraftaufnahme der Rückstellkräfte über der Zeit aufgetragen. Der Verlauf ist in der Grafik dargestellt. Wichtige Zeitpunkte sind: t_2 bzw. t_s = Beginn des Netzwerkaufbaus "Anvulkanisationszeit", t_{10} = Zeit für 10% Netzwerkaufbau, t_{50} = halbe Vulkanisation und t_{90} = der Zeitpunkt, an dem 90% der Vulkanisation eingetreten ist. Nach Überschreiten des Plateaus wird das Netzwerk abgebaut bzw. neu aufgebaut, was sich letztlich auch in anderen physikalischen Eigenschaften bemerkbar macht.

Die Alterung beginnt!



Rheovulkameterkurve

Spritzgussverfahren

... angewandt auf:

Thermoplaste,

wie PP, HDPE, PET, PA, POM, PEEK, ...

werden **heiß** in eine **kühlere Form** eingespritzt und erstarren dort

Anwendungen: Verpackungen, Küchengeräte, Gebrauchsartikel,...

Duroplaste, Elastomere,

wie PU, Epoxy-, Polyesterharze oder Gummi (Naturkautschuk, EPDM, NBR, CR,...)

werden **kalt** in eine **heiße Form** eingespritzt und reagieren, vulkanisieren dort

Anwendungen: Bremsbeläge, Kupplungen, Schuhsohlen, Reifen, Dichtungen, ...

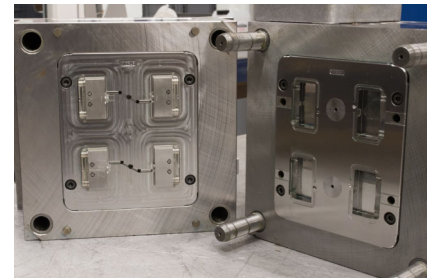
Werkstoffe und deren Ablage



Quelle: <https://www.sealanddesign.com/wp-content/uploads/2024/08/SD-Elastomeric-Compounds.png>

- Streifen
- Granulate
- Stücke

Werkzeuge = Formen



Quelle: <https://www.ion.si/en/service/tools-for-injection-molding-of-thermoplastics-duroplastics/>

Automaten

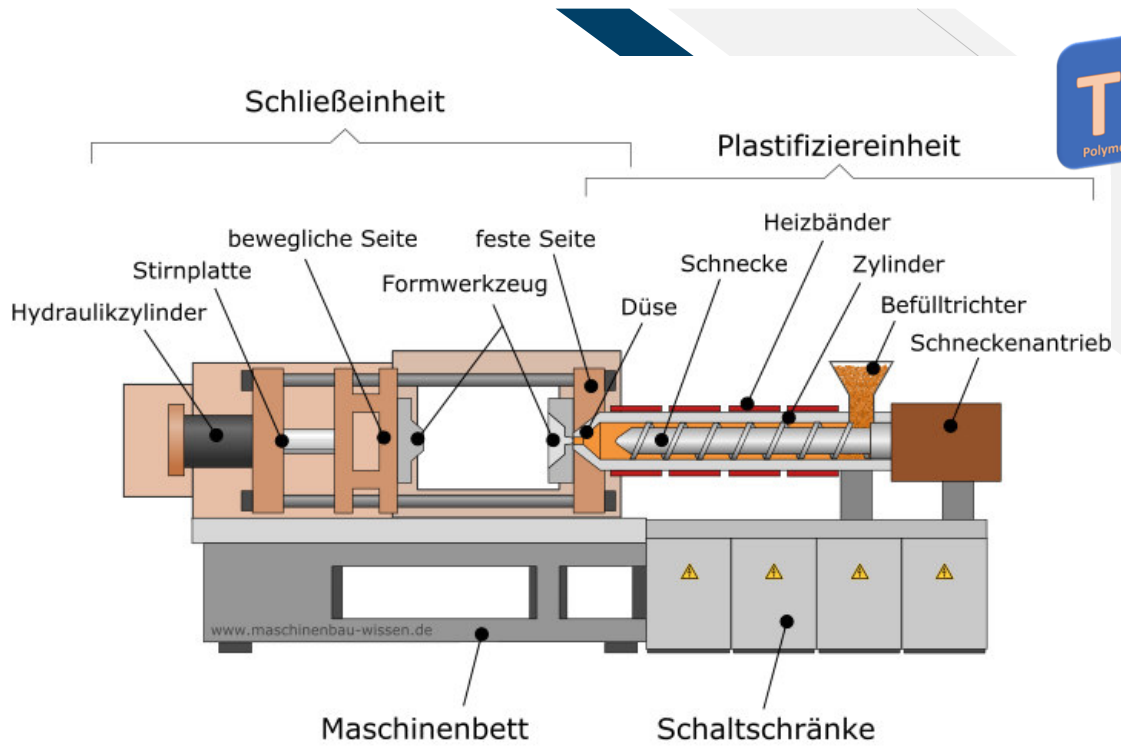
Beispiel



Spritzgießmaschine für die Branchen Teletronics und Technical Moulding (Bild: Fa. Engel)

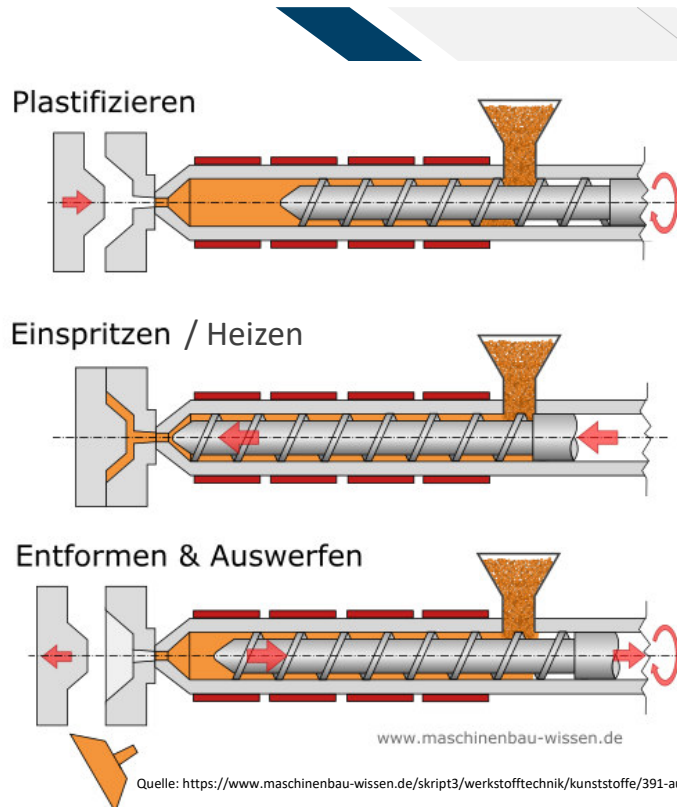
Quelle: <https://www.kgk-rubberpoint.de/verarbeitung/fakuma-2017-spritzgiessmaschine-fuer-teletronics-und-technical-moulding.html>

Aufbau



Quelle: <https://www.maschinenbau-wissen.de/skript3/werkstofftechnik/kunststoffe/391-aufbau-spritzgiessmaschine>

Prozessablauf



Quelle: <https://www.maschinenbau-wissen.de/skript3/werkstofftechnik/kunststoffe/391-aufbau-spritzgiessmaschine>

Kenndaten

Tabelle 15.12 Istwertprotokoll für Spritzgießfertigung mit Vulkanisationszeitregelung

		Gemessen	Berechnet
Zyklusnummer	16958		
Zykluszeit	524 s	x	
Gesamtzykluszeit	803 s	x	
Heizzeit	480 s	x	
Extrudierzeit	65 s	x	
Einspritzzeit Phase 1	19,2 s	x	
Einspritzzeit Phase 2	10,1 s	x	
Mittlerer Einspritzdruck	846 bar		x
Heizplatte oben außen	179 °C	x	
Heizplatte oben innen	178 °C	x	
Heizplatte unten außen	179 °C	x	
Heizplatte unten innen	177 °C	x	
Temperiergerät Extruder	79 °C	x	
Temperiergerät Injektion	79 °C	x	
Werkzeugheizung 1	179 °C	x	
Werkzeugheizung 2	178 °C	x	
Produktstarttemperatur \bar{T}_o	133,52 °C		x
Wandtemperatur T_w	165,93 °C	x	
Produkttemperatur T_M	154,70 °C		x
Relativer Reaktionswert RRW	0,700237		x



Quelle: Röthemeyer, Sommer, „Kautschuktechnologie“, Carl Hanser Verlag, München 2013

Eigenschaften der Formgebung - Thermoplaste



Bei Thermoplasten werden die Formen, genannt Werkzeuge mittels Finite Elemente Berechnungen ausgelegt und der Einspritzvorgang simuliert.

FEA zur Werkzeugauslegung <https://www.youtube.com/watch?v=GVBv2Yz4n2c>

Da das Material als Flüssigkeit eingebracht wird ist die Physik der Fluidodynamik das Medium der Beschreibung Grundsätzlich sind Druck, Temperatur, Fließeigenschaften und das jeweilige Erstarrungsverhalten des Werkstoffes zu betrachten.

Die wohl wichtigsten Grundlagen zur Modellierung, Beschreibung der Formgebung ist der Wärmeübergang.

Beim Einbringen der heißen Polymerflüssigkeit in ein kaltes Werkzeug gibt es in der Regel drei wesentliche Phasen:
 Das Anspritzen, 1. Zyklus zum Füllen des Anguss – niedrigerer Druck, langsamerer Volumenvorschub
 Das Einspritzen, 2. Zyklus zum Füllen der Form – hoher Druck, schnellerer Volumenvorschub
 Der Nachdruck, 3. Zyklus zum Ausfüllen aller Ecken und Kanten – höherer Druck, gehalten, kaum Volumenvorschub

Eigenschaften der Formgebung - Duroplaste, Elastomere

Bei Duroplasten und Elastomere werden die Formen, genannt Werkzeuge ebenfalls mittels Finite Elemente Berechnungen ausgelegt und der Einspritzvorgang simuliert. Auch hier wird das Material als Flüssigkeit eingebracht und die Physik der Fluidodynamik ist das Medium der Beschreibung. Grundsätzlich sind Druck, Temperatur, Fließeigenschaften und das jeweilige Reaktionsverhalten, Vernetzungsverhalten des Werkstoffes zu betrachten.

- > Vulkanisation

Die wohl wichtigsten Grundlagen zur Modellierung, Beschreibung der Formgebung ist der Wärmeübergang. Dieser spielt in sofern ein Rolle, da die Energie zur Reaktion eingebracht, bzw. abgeführt werden muss.

Beim Einbringen der kalten Polymerflüssigkeit in ein heißes Werkzeug gibt es in der Regel vier wesentliche Phasen:
Das Anspritzen, 1. Zyklus zum Füllen des Anguss – niedrigerer Druck, langsamerer Volumenvorschub
Das Einspritzen, 2. Zyklus zum Füllen der Form – angepasst hoher Druck, schnellerer Volumenvorschub
Der Nachdruck, 3. Zyklus zum Ausfüllen aller Ecken und Kanten – höherer Druck, gehalten, kaum Volumenvorschub
Die Heizzeit, 4. Zyklus zur Umsetzung der Reaktion

Beispiel Aerosoldichtungen



Spritzguss von Aerosoldichtungen

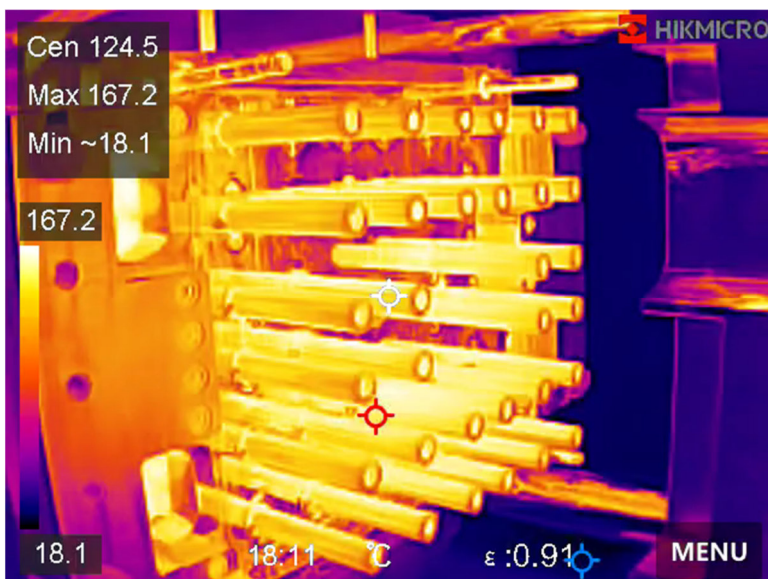
- Kaltkanalprüfung



- 32-Fach Werkzeug
- Kaltkanalinjektoren
Anforderung: unter 75°C
- Gleichmäßige Wärme, Druck
und Materialverteilung

Spritzguss von Aerosoldichtungen

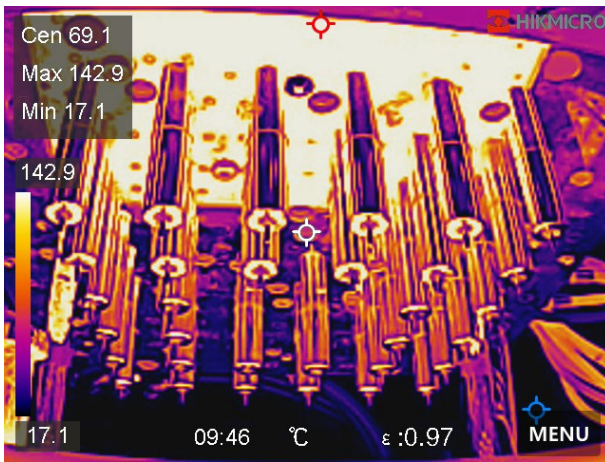
- Werkzeugprüfung



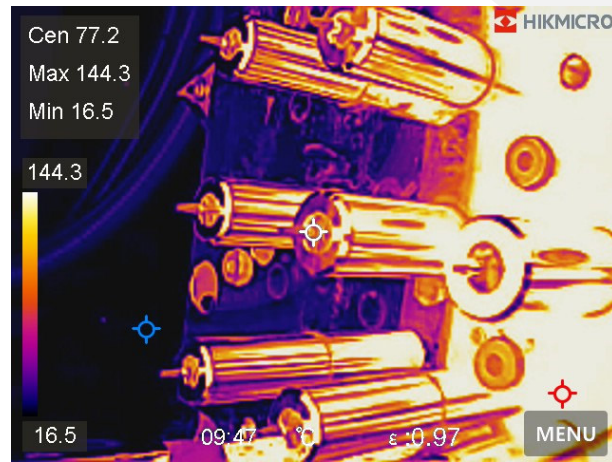
- 32-Fach Werkzeug
- Linke Seite: Dorne
Rechte Seite: Stirnplatte mit Anguss
Anforderung: über 165°C
- Gleichmäßige Wärme, Druck
und Materialverteilung
- Zustand nach mehr als 20 Zyklen
- Stirnplattenseite kälter

Spritzguss von Aerosoldichtungen

- Kaltkanalprüfung, nach >20 Zyklen



Ansicht von Oben
- Wärmeverteilung
- Kaltkanalisation o.k.



Ansicht von der Seite
- Wärmeverteilung
- Kaltkanalisation o.k.

Zusammenfassung

Thermographie im Spritzguss

Fragestellung

- Kann Thermographie im Spritzguss verwendet werden?
- Welche Fragen können mit Thermographie bearbeitet oder gelöst werden ?
- Welche darüber hinaus ?
- Welchen Beitrag kann Thermographie in der Entwicklung leisten ?
- Ist Thermographie ein geeignetes Messmittel ?





Antwort und Nutzen

- Ja, da der Wärmeübergang die Produkte beeinflusst.
- Fragen zu Unterschieden im Wärmeübergang und der Restwärme, aber auch der Reaktionswärme.
Fragen zur Wärmeverteilung im Kalt oder Heißkanal
- In der Wiederholung können dynamische Änderungen im Prozess beobachtet werden.
Anfahren – Produzieren -Abfahren
- Die Thermographie deckt schnell auf, ob ein Werkzeug gleichmäßig oder ungleichmäßig die Wärme verteilt.
.., ob die Wärme gut oder nicht gut ein-/ausgebracht wird
- Ja, insbesondere in der Qualitätsprüfung



TBK

Technische Beratung in der
Gummi- und Kunststoffindustrie

-  Dr. Dirk Kilian
-  +49 163 2871300
-  info@tbk-service.com
-  www.tbk-service.com