

eingereicht/handed in: 01.08.2022  
angenommen/accepted: 03.11.2022

**Ingrid Sturm, Christian Hopmann, Cihan Koyuncu,**  
**Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV) an der RWTH Aachen**

## **Einflüsse von Material- und Prozessparametern beim IMKS unter Verwendung von wärmeleitfähigen Kunststoffen**

*Die Einsatzmöglichkeit von wärmeleitfähigen Kunststoffen im Zusammenhang mit dem Integrierten Metall/Kunststoff-Spritzgießen (IMKS) ist noch nicht geklärt. Es werden Empfehlungen hinsichtlich Verarbeitungsparametern und der Nutzung von wärmeleitfähigen Trägermaterialien entwickelt, um die entstehende Wärme von den Leiterbahnen durch den Kunststoffträger abzuleiten. Dazu werden Einflüsse aus Material- und Prozessparametervariationen auf die maximal mögliche Leiterbahnlänge, die spezifische elektrische Leitfähigkeit am Leiterbahnbeginn und -ende sowie auf die Bauteilerwärmung untersucht. Hierzu werden Probekörper unter Variation von Material- und Prozessparametern hergestellt und die zuvor genannten Bauteileigenschaften analysiert.*

## **Influences of material and process parameters in IMKS using thermally conductive plastics**

*The possibility of using thermally conductive plastics in combination with the integrated metal/plastic injection moulding (IMKS) has not been investigated, yet. Guidelines regarding processing parameters and the use of thermally conductive carrier materials are developed, in order to dissipate the generated heat from the conductive path through the plastic carrier. For this purpose, influences of material and process parameter variations on the maximum possible conductor track length, the specific electrical conductivity at the start and end of the conductor track and the component heating are investigated. For this reason, test specimens are produced by varying material and process parameters and the previously mentioned component properties are analysed.*

# Einflüsse von Material- und Prozessparametern beim IMKS unter Verwendung von wärmeleitfähigen Kunststoffen

I. Sturm, C. Hopmann, C. Koyuncu

## 1      EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG

Nicht immer können Anforderungen an Elektronikbauteile von einem Material erfüllt werden, sondern es sind oftmals Kombinationen aus leitfähigen Metallen und Kunststoffen nötig [1, 2]. Solche Hybridbauteile zeichnen sich durch hohe Funktionsintegration und freie Gestaltungsmöglichkeiten aus [1, 2]. Durch die Nutzung von Kunststoffen wird zum einen Gewicht eingespart, zum anderen ermöglicht die freie Formgebung zahlreiche neue Gestaltungsvarianten. Ferner dienen Kunststoffe der Isolation. Metalle hingegen zeichnen sich durch ihre hohe Leitfähigkeit, aber auch durch ihre hohe Steifigkeit und Festigkeit aus [3]. Der wachsende Markt von elektrischen und elektronischen Bauteilen hat fortwährend neue Herstellungsverfahren hervorgebracht, da etablierte Verfahren zur Herstellung von hybriden Kunststoff/Metall-Bauteilen häufig kosten- und zeitintensiv sind. Zudem sind die erreichbaren elektrischen Eigenschaften und die Freiheitsgrade hinsichtlich der Formgebung oft limitiert. Deshalb besteht im Rahmen der technologischen Weiterentwicklung ein Bedarf darin, komplexe dreidimensionale Kunststoffbauteile mit integrierten metallischen Leiterbahnen und guten elektrischen Eigenschaften herzustellen [2]. Demzufolge werden Verfahren wie die 3D-Moulded Interconnect Devices (3D-MID) Technologien den wachsenden Produkthanforderungen in der Elektronikindustrie, wie einer erhöhten Komplexität des Bauteils bei gleichzeitiger Miniaturisierung, nicht mehr gerecht [1, 2, 4, 5].

Das Integrierte Metall/Kunststoff-Spritzgießen (IMKS) ist ein Verfahren zur Herstellung von hybriden Kunststoff/Metall-Bauteilen in einem Zyklus auf einer Spritzgießmaschine. Das Verfahren zeichnet sich durch eine weitestgehend uneingeschränkte Formgebungsmöglichkeit aus [6]. Zudem können durch die Reduktion von Fertigungsschritten Prozesszeit und somit Kosten eingespart werden [1, 7]. In Anlehnung an das Mehrkomponenten-Spritzgießen wird durch eine Verfahrenskombination aus Spritzgießen und Metall-Druckgießen zunächst ein Kunststoffträger hergestellt, welcher anschließend in eine zweite Kavität umgesetzt und mit einer Metalllegierung überspritzt wird [8, 9]. Dabei ist die erreichbare spezifische elektrische Leitfähigkeit aufgrund der Leitfähigkeit der eingesetzten Metalllegierungen (bis  $8,0 \cdot 10^6$  S/m) etwas niedriger als bei Konkurrenzverfahren wie den 3D-MID Technologien mit einer spezifischen elektrischen Leitfähigkeit von bis zu  $5,6 \cdot 10^7$  S/m [2, 10].

Zudem bietet der Einsatz von wärmeleitfähigen Kunststoffen neue Möglichkeiten der Funktionsintegration, da beispielsweise ein schwererer metallischer Kühlkörper durch einen spritzgegossenen Kühlkörper aus wärmeleitfähigen Kunststoffen ersetzt werden kann. Dieser kann funktional im Bauteil integriert werden, indem er gleichzeitig als Gehäuse fungiert und zur Fixierung anderer Bauteile aus der Baugruppe verwendet wird [6]. Dies kann beispielsweise bei einer Kennzeichenleuchte Anwendung finden.

Bisher ist die Einsatzmöglichkeit von wärmeleitfähigen Kunststoffen als Trägermaterial im Zusammenhang mit dem IMKS noch nicht geprüft worden. Zudem fehlen Kenntnisse über die Tragweite der Vorteile von wärmeleitfähigen Kunststoffen bei E/E-Anwendungen sowie den potenziellen Nachteilen beim Einsatz im IMKS. Es liegt demnach kein ausreichendes Wissen über die Eignung von wärmeleitfähigen Kunststoffen als Trägermaterial beim IMKS vor. Zudem gibt es noch keine hinreichenden Erkenntnisse bezüglich der Veränderung der Bauteileigenschaften, wie der realisierbaren Leiterbahnlänge bei Verwendung von wärmeleitfähigen Kunststoffen und in Abhängigkeit von verschiedenen Prozessparametern.

Ziel der vorliegenden Untersuchungen ist daher die Überprüfung der Materialkompatibilität von wärmeleitfähigen Kunststoffen und niedrigschmelzendem Lot im Zusammenhang mit dem IMKS sowie die Ermittlung von prozess- und materialbedingten Verarbeitungsempfehlungen. Es sollen Vor- und Nachteile hinsichtlich des Einsatzes von wärmeleitfähigen Kunststoffen im IMKS ermittelt werden. Zudem sollen Erkenntnisse hinsichtlich des Wärmetransports durch thermisch leitfähige Kunststoffe erarbeitet werden. Hierzu werden Probekörper aus drei unterschiedlichen Trägermaterialien und einer niedrigschmelzenden Metalllegierung unter Variation der Prozessparameter hergestellt und anhand verschiedener Bewertungskriterien untersucht. Es wird die realisierbare Leiterbahnlänge analysiert und die Probekörper werden elektrischen Prüfungen unterzogen, um den Einfluss von wärmeleitfähigen Trägermaterialien auf die physikalischen Eigenschaften zu untersuchen.

## **2            STAND DER TECHNIK**

Im Rahmen dieses Kapitels wird zunächst das Integrierte Metall/Kunststoff-Spritzgießen vorgestellt, anschließend werden Grundlagen zu wärmeleitfähigen Kunststoffen dargelegt.

### **2.1          Integriertes Metall/Kunststoff-Spritzgießen (IMKS)**

Wie in Kapitel 1 dargelegt, weisen die etablierte Verfahren zur Herstellung hybrider Kunststoff/Metall-Bauteile Restriktionen auf [2]. Eine Alternative zu

diesen Verfahren ist das am Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV) in Aachen entwickelte Integrierte Metall/Kunststoff-Spritzgießen (IMKS) [1, 7, 11]. Beim IMKS wird das Kunststoff-Spritzgießen mit dem Metall-Druckgießen kombiniert, sodass Kunststoff/Metall-Hybridbauteile in einem Werkzeug und auf einer Maschine herstellbar sind. Ein großer Vorteil dieses Verfahrens gegenüber den anderen Technologien liegt in der Verkürzung von Prozess- und Montageschritten [1, 2]. Auch die zuvor aufgeführten Nachteile bezüglich der eingeschränkten Formgebung können mit dem IMKS überwunden werden [1, 2, 11, 12]. In Bild 1 ist das Prinzip des IMKS dargestellt.

In der ersten Kavität des Zwei-Kavitäten-Werkzeugs wird zunächst ein Kunststoffträger spritzgegossen. Anschließend wird dieser in die zweite, für das Druckgießen vorgesehene Kavität umgesetzt, z. B. durch ein Handling oder einen Drehteller. Ein Druckgießaggregat zur Verarbeitung der niedrig schmelzenden Metalllegierung ist direkt an das Spritzgießwerkzeug angeflanscht, welches über die Kernzugsteuerung der Spritzgießmaschine gesteuert wird. Anschließend wird der Kunststoffträger mit der metallischen Leiterbahn überspritzt [8, 9].

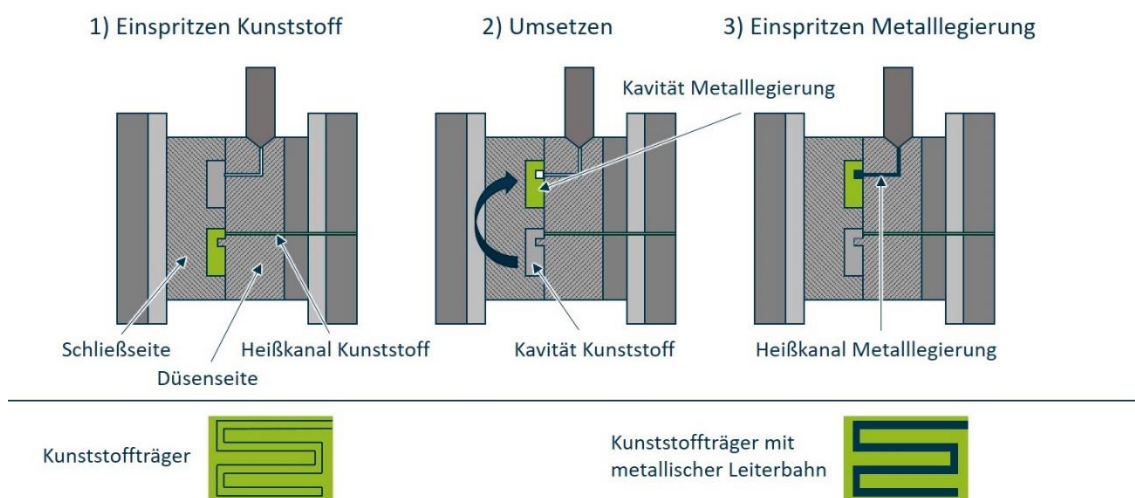


Bild 1: Prinzip des Integrierten Metall/Kunststoff-Spritzgießens (IMKS)

## 2.2 Thermisch leitfähige Kunststoffe

Allgemein zeigen Kunststoffe eine niedrige Wärmeleitfähigkeit, die üblicherweise zwischen  $0,15 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  und  $0,50 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  liegt [13]. Um die Wärmeleitfähigkeit von Kunststoffen zu steigern, können wärmeleitfähige Füllstoffe in den Kunststoff compoundingiert werden. Dadurch können Wärmeleitfähigkeiten von etwa  $1 - 20 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  erreicht werden [14-16]. Die für die Steigerung der Wärmeleitfähigkeit genutzten Füllstoffe können grundsätzlich in metallische (Aluminium, Magnesiumoxid, Kupfer und Berylliumoxid), organische (Carbon Nanotubes und Graphit) und keramische Füllstoffe (z. B. Bornitrid) unterteilt

werden [14-17]. Ferner kann durch Variation der Füllstoffart und des Füllstoffgrads die Wärmeleitfähigkeit von Kunststoffen dem jeweiligen Anwendungsfall entsprechend gezielt angepasst werden [15, 16].

Thermisch leitfähige Kunststoffe entwickeln je nach Füllstoffgeometrie und Menge ein isotropes oder anisotropes Wärmeleitverhalten. Wie auch bei elektrisch leitfähigen Füllstoffen ergibt sich für thermisch leitfähige Füllstoffe ein Perkulationsverhalten [18]. So kommt es zu einer strömungsinduzierten Orientierung der Füllstoffpartikel bei der Verarbeitung, wodurch sich eine Vorzugsrichtung der Wärmeleitung ausbildet [16]. Allgemein unterscheidet sich die Verarbeitung von wärmeleitfähigen Kunststoffen zu konventionellen, ungefüllten Kunststoffen. Durch eine erhöhte Wärmeleitung in der Schmelze erstarrt der Randbereich schneller und verengt den Fließkanal. Folglich müssen sowohl die Prozessführung als auch die Prozessparameter an die veränderten Werkstoffeigenschaften angepasst werden. Neben einer erhöhten Werkzeugtemperatur müssen Einspritzgeschwindigkeit und Einspritzdruck erhöht werden. Dies führt zu einem verengten Verarbeitungsfenster, in dem das Polymer nicht beschädigt wird [14].

## 2.3      **Ableitung des Forschungsbedarfs**

Um die Attraktivität des IMKS zu erhöhen und für weitere Anwendungen, wie der Herstellung von KFZ-Kennzeichenleuchten, zu quantifizieren, muss die Kompatibilität mit wärmeleitfähigen Kunststoffen nachgewiesen werden.

Bisherige Untersuchungen haben gezeigt, dass mit dem IMKS spezifische elektrische Leitfähigkeiten von über  $8,0 \cdot 10^6$  S/m erzielt werden. Diese spezifische elektrische Leitfähigkeit liegt in der für Anwendungen im Elektro- und Elektronikbereich üblichen Größenordnung [2, 11]. Da thermisch leitfähige Kunststoffe zunehmend eine wichtige Rolle beim Wärmemanagement von E/E-Bauteilen einnehmen, muss der bisher nicht bewertete Einfluss der Werkstoffe auf die spez. elektrische Leitfähigkeit sowie die Verarbeitung im IMKS untersucht werden. Somit ergeben sich folgende Forschungsfragen, die im Rahmen des Beitrags beantwortet werden:

- Lassen sich IMKS-Bauteile grundsätzlich mit wärmeleitfähigen Kunststoffen realisieren?
- Welchen Einfluss haben wärmeleitfähige Kunststoffe auf die resultierenden Leiterbahnlängen?
- Welche elektrischen Eigenschaften lassen sich durch das IMKS im Zusammenhang mit wärmeleitfähigen Kunststoffen realisieren?

### 3            **EXPERIMENTELLE ANALYSEN**

Um die aufgestellten Forschungsfragestellungen zu beantworten, werden zwei Versuchspläne (einer für den Spritzgieß- und einer für den Druckgießprozess) miteinander kombiniert, um anschließend Einflüsse der Material- und Prozessparameterkombinationen auf unterschiedliche Qualitätsfaktoren der hergestellten IMKS-Bauteile zu ermitteln. Die Versuchsergebnisse werden anschließend anhand unterschiedlicher Kriterien statistisch ausgewertet, sodass Effekte der Prozessparameter auf die realisierbare Leiterbahnlänge, die spezifische elektrische Leitfähigkeit und die Stromtragfähigkeit abgeleitet werden können [19]. Diese Auswertung gliedert sich in drei Schritte:

Zunächst wird ein Vergleich zwischen der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit am Leiterbahnbeginn und -ende gezogen, um Leitfähigkeitsunterschiede zu detektieren. Hierbei sollen Material- und Prozessparametereinflüsse untersucht werden, wobei der Fokus auf der Auswertung des Druckgießversuchsplans liegt. Für die Analyse der Einflüsse von Prozessparametern auf die realisierbaren Leiterbahnlängen werden beide Versuchspläne ausgewertet, um material- und prozessbedingte Verarbeitungsempfehlungen abzuleiten. Hierzu werden zum einen die Spritzgießparameter betrachtet, um Einflüsse, möglicherweise bedingt durch Verzug und Schwindung, auf die Trägerplatte zu identifizieren. Zum anderen dient die Analyse der Druckgießparameter der direkten Identifikation von Einflüssen auf die Leiterbahnlänge. Des Weiteren wird die Bauteilerwärmung über die Stromtragfähigkeit der Bauteile untersucht, um Rückschlüsse auf die Materialeignungen zu ziehen und die Einflüsse verschiedener Prozessparameter identifizieren zu können.

#### 3.1            **Werkzeug- und Anlagentechnik**

Die Probekörperherstellung erfolgt unter Verwendung einer vollhydraulischen Spritzgießmaschine des Typs Demag Ergotech 80/420 – 310 System von der Sumitomo Demag Plastics Machinery GmbH, Schwaig, Deutschland. Weiterhin weist die Maschine hydraulisch betriebene Kernzüge auf, die das Rüsten und den Betrieb eines Beistellaggregats ermöglichen. Die Werkzeugtemperierung erfolgt über zwei separate Temperiergeräte des Typs Regloplas P140 der Regloplas AG, St. Gallen, Schweiz. Zur Verarbeitung der metallischen Schmelze wird ein Druckgießaggregat der Heinze Kunststofftechnik GmbH & Co. KG, Herford, Deutschland, verwendet. In den Schmelztiegel des metallischen Lots wird zusätzlich Stickstoff eingeleitet, um die Bildung von Metalloxiden zu vermeiden.

Das verwendete hybride, modular aufgebaute Spritzgießwerkzeug besitzt zwei Kavitäten und zwei separate, getrennte Angussysteme sowie ein Auswerfersystem. Die Angüsse für den Kunststoff und für das metallische Lot sind jeweils mit einem Heißkanal ausgestattet. Zur Fertigung der zu untersuchenden Probekörper wurde ein Werkzeugeinsatz konstruiert und gefertigt. Die

Kunststoffprobekörper weisen eine Grundfläche von 101 mm x 124,4 mm und eine Dicke von 3 mm auf, Bild 2. Im Kunststoffträger ist eine Nut in Form einer Fließspirale aus zehn geraden Abschnitten und neun 180°-Kurven vorgesehen, in die im zweiten Schritt die flüssige Metallschmelze injiziert wird. Die Gesamtleiterbahnlänge beträgt 800 mm und deckt alle gängigen Anwendungen im E/E-Bereich ab [20]. Aufbauend auf Erkenntnisse vorangegangener Arbeiten wird der Leiterbahnquerschnitt quadratisch mit einer Querschnittsfläche von 2,25 mm<sup>2</sup> gewählt [2, 11].

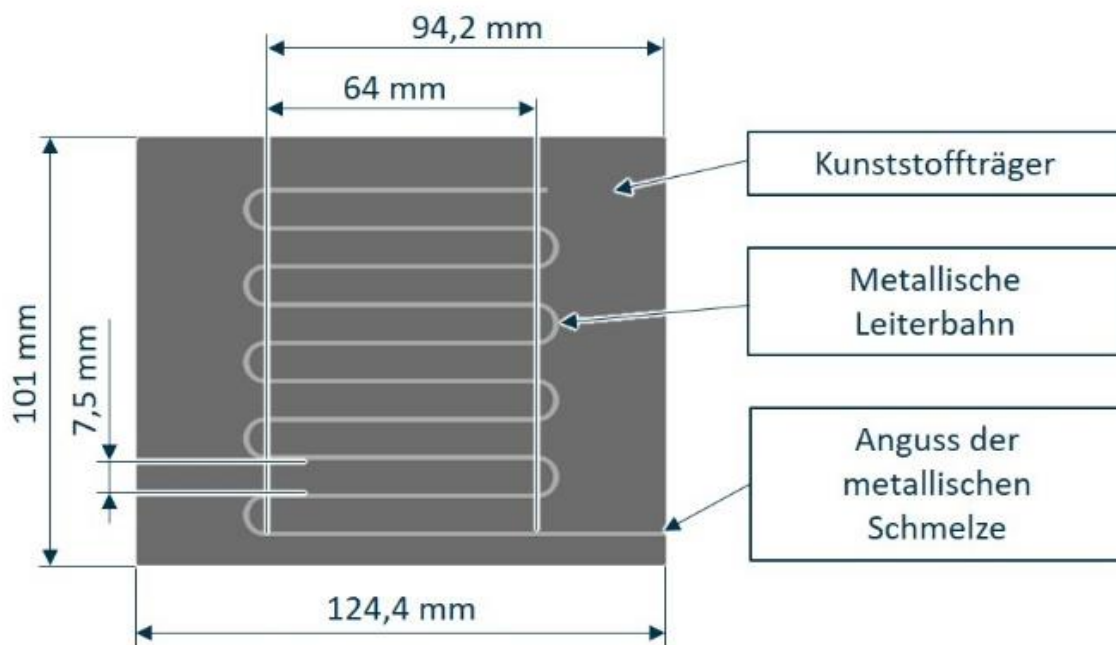


Bild 2: IMKS-Probekörpergeometrie

### 3.2 Material- und Prozessparameterauswahl

Zur Probekörperherstellung der Kunststoffträger kommen drei Polycarbonate der Typen Makrolon 2405, Makrolon TC110 und Makrolon TC210 der Covestro Deutschland AG, Leverkusen, Deutschland, zum Einsatz. Makrolon TC110 und Makrolon TC210 sind wärmeleitfähig und weisen eine Wärmeleitfähigkeit von 1,0 W/m·K (TC110) sowie von 1,4 W/m·K (TC210) auf. Makrolon 2405 hingegen ist nur gering wärmeleitfähig (0,2 W/m·K) und dient als Referenzmaterial, um den Einfluss von wärmeleitfähigen Kunststoffen im Zusammenhang mit dem IMKS zu bewerten [21-23].

Zur Herstellung der metallischen Leiterbahnen wird die Legierung Sn100Ni+ von der FELDER GmbH Löttechnik, Oberhausen, Deutschland, verwendet, welche nahezu ausschließlich aus Zinn besteht und ein Standardmaterial für E/E-Anwendungen darstellt [24]. Der Schmelzpunkt liegt mit 227 °C im gemeinsamen

Verarbeitungsbereich mit den Kunststoffen [21-24]. Die spezifische elektrische Leitfähigkeit liegt bei  $7,5 \cdot 10^6$  S/m [24].

Zunächst werden die wichtigsten Spritzgießprozessparameter herausgearbeitet, die einen Einfluss auf die zu untersuchenden Eigenschaften haben könnten. Die Kunststoffschmelze- und Werkzeugtemperatur haben maßgeblichen Einfluss auf das Füllverhalten während des Spritzgießvorgangs. Durch unterschiedlich hohe Temperaturgradienten wird dadurch zudem Verzug und Schwindung beeinflusst. Die Variation der Einspritzgeschwindigkeit beeinflusst die Bauteiloptik, aber auch das Füllverhalten im Prozess. Mit dem Nachdruck soll zudem ein weiterer Parameter betrachtet werden, der einen Einfluss auf die Schwindung des Bauteils hat [5]. Es ergibt sich daher ein vollfaktorieller  $2^4$ -Versuchsplan mit den in Tabelle 1 dargestellten Parametergrenzen, deren Grundlage die Datenblätter der jeweiligen Materialien bilden [21-23].

Prozessparameter	Einheit	-	+
Einspritzgeschwindigkeit $v_{\text{Ein}}$	[cm <sup>3</sup> /s]	40	50
Massetemperatur $T_{\text{KS}}$	[°C]	280   300	300   320
Werkzeugtemperatur $T_{\text{WZ}}$	[°C]	60	80
Nachdruck $p_{\text{N}}$	[bar]	400	700

*Tabelle 1: Parameter und Faktorstufen des Spritzgießversuchsplans ( $T_{\text{KS}}$ : links: Makrolon 2405; rechts: Makrolon TC110 und Makrolon TC210)*

Infolge unterschiedlich schneller Abkühlvorgänge beeinflusst druckgießseitig die Schmelze- und Werkzeugtemperatur die Bildung von Fehlstellen wie Luft-einschlüsse und damit auch indirekt die elektrische Leitfähigkeit [25]. Da die Werkzeugtemperatur im Spritzgießversuchsplan bereits variiert wird, sollen die thermischen Randbedingungen druckgießseitig nur über die Schmelzetemperatur des metallischen Lots ( $T_{\text{MS}}$ ) untersucht werden. Durch verschiedene Einspritzgeschwindigkeiten soll zwischen einem schnellem und einem langsamen Einspritzvorgang unterschieden werden. Die Einspritzgeschwindigkeit wird durch den Kolbendruck und die Kolbengeschwindigkeit, welche maschinen-seitig über die Kernzugsteuerung eingestellt und über einen prozentualen Wert der maximalen Kolbengeschwindigkeit angegeben wird, vorgegeben. Somit werden die Schmelzetemperatur des metallischen Lots und die Kolbengeschwindigkeit mit konstantem Kolbendruck als Versuchsparameter anhand des vollfaktoriellen  $2^2$ -Versuchsplans (s. Tabelle 2) betrachtet, dessen Grundlage sowohl Voruntersuchungen als auch die Angaben des Materialdatenblatts bilden [24].



Prozessparameter	Einheit	-	+
Massetemperatur $T_{Ms}$	[°C]	290	330
Kolbengeschwindigkeit $v_K$	[%]	30	40

*Tabelle 2: Parameter und Faktorstufen des Druckgießversuchsplans*

### 3.3 Bauteilanalysen

Zur Auswertung der Versuchspläne werden verschiedene Bauteilprüfungen durchgeführt. Zunächst werden die optischen Analysen, die entsprechende Probenpräparation und die Messung der Leiterbahnlängen vorgestellt. Ferner wird die Herangehensweise bei den elektrischen Prüfverfahren erläutert. Im Rahmen der Auswertung werden signifikante Effekte mit einer Signifikanzgrenze von 95 % lediglich anhand einer Haupteffektanalyse ermittelt.

#### 3.3.1 Optische Analysen und Bestimmung der Leiterbahnlängen

Die mikroskopischen Untersuchungen dienen der Identifizierung von Lufteinschlüssen und Lunkern, die eine direkte Aussage über den elektrischen Widerstand und damit über die Leitfähigkeit der Leiterbahn ermöglichen. Hierzu werden einzelne Abschnitte mit einer Länge von 20 mm und einer Breite von 5 mm aus der Leiterbahn präpariert, so dass ein Längsschnitt entlang der Leiterbahn entsteht. Die Mikroskopieaufnahmen werden mit einem VHX-5000 Digitalmikroskop der Keyence Deutschland GmbH, Neu-Isenburg, Deutschland, und einem Weitbereichszoomobjektiv VH-Z50 UR mit einer 50-fachen Vergrößerung erstellt.

Für die Messung der fließspiralförmigen Leiterbahnlänge wurde eine Schablone in Anlehnung an die Probekörpergeometrie konstruiert und aus PLA von Prima Printer Nordic AB, Malmö, Schweden, mit Hilfe einer Creality Ender 3 FDM-Anlage von Comgrow 3D Technology Co., Limited, Hongkong, China, gefertigt. Pro Versuchspunktkombination werden fünf Probekörper vermessen.

#### 3.3.2 Elektrische Prüfverfahren

Mit den elektrischen Prüfverfahren werden wesentliche Qualitätsmerkmale von Kunststoff/Metall-Bauteilen mit wärmeleitfähigen Kunststoffkühlkörpern untersucht. Neben der Analyse der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit wird die Stromtragfähigkeit untersucht.

##### 3.3.2.1 Spezifische elektrische Leitfähigkeit

Zur Messung der elektrischen Leitfähigkeit wird der jeweilige Probekörper zur Fixierung in eine Aufnahme eingespannt und ein Netzteil des Typs Hioki 3541 Resistance Hi-Tester der ASM GmbH Automation, Moorsinning, Deutschland, durch zwei Aufsatzelektroden am Anfang und am Ende der Leiterbahn angeschlossen. Um Qualitätsunterschiede zu detektieren, werden für jede Untersuchungsreihe

die Probe am Leiterbahnbeginn und am -ende geprüft. Aus jeder Versuchspunktombination werden sechs Prüfkörper nacheinander untersucht. Der gemessene Wert entspricht dem spezifischen Widerstand und wird anschließend in die spezifische elektrische Leitfähigkeit umgerechnet [2].

Durch die Ermittlung der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit können Indizien auf Fehlstellen geschlossen und damit direkte Einflüsse von Materialparametern sowie Auswirkungen von Normprüfungen ermittelt werden.

### 3.3.2.2 Stromtragfähigkeit

Um Rückschlüsse auf einen möglichen Wärmeabtransport durch die wärmeleitfähigen Kunststoffe ziehen zu können, werden Analysen zur Bauteilerwärmung bei konstanter Strombelastung durchgeführt. Zur Messung der Bauteilerwärmung wird der jeweilige Probekörper eingespannt und ein Netzteil des Typs HCS-3600 von Manson Engineering Industrial Ltd., Hongkong, China, durch zwei Aufsatzelektroden am Anfang und am Ende der Leiterbahn für 20 Minuten angeschlossen. Bei der Untersuchung der Stromtragfähigkeit werden die Extrema der Versuchspläne sowie die Versuchspunktombination mit der höchsten und niedrigsten spezifischen elektrischen Leitfähigkeit verwendet.

Um eine mögliche Langzeitbeständigkeit abzuleiten, wurden für die vorliegenden Versuche extrem hohe Stromstärken von 20 A gewählt. Dadurch können Effekte sichtbar gemacht und maximale Stromstärken, denen die Bauteile standhalten sollen, abgeleitet werden. Die Temperatur wurde mit Hilfe einer Wärmebildkamera des Typs ThermoVision A600-Series der Flir Systems Inc., Wilsonville, USA, gemessen. Um den Einfluss des differierenden Emissionsgrads der Probekörper zu minimieren, werden diese zuvor mattschwarz lackiert. Für die Auswertung der Thermographieaufnahmen wird die Software ThermaCAM Researcher Pro 2.8 SR-3 von Flir Systems Inc. genutzt.

## 4 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

Die hergestellten Probekörper werden anhand der in Kapitel 3.3 beschriebenen Analysen ausgewertet. Dafür werden zunächst in Kapitel 4.1 die Einflüsse der Material- und Prozessparametervariation auf die realisierbare Leiterbahnlänge vorgestellt. Anschließend werden in Kapitel 4.2 die Einflüsse auf die Bauteilerwärmung und in Kapitel 4.3 die Ergebnisse hinsichtlich der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit dargelegt.

### 4.1 Einfluss der Material- und Prozessparametervariation auf die realisierbare Leiterbahnlänge

Die Versuchsreihe hinsichtlich der realisierbaren Leiterbahnlängen dient der Analyse der Einflüsse durch unterschiedliche Prozessparameter und Kunststoff-

trägermaterialien. Die Beurteilung erfolgt zunächst anhand der Auswertung des Spritzgießversuchsplans. Anschließend erfolgt die Auswertung zur Untersuchung der Druckgießparametereinflüsse auf die realisierbare Leiterbahnlänge.

#### 4.1.1 Ergebnisse der spritzgießseitigen Parametervariation

Im Spritzgießversuchsplan bilden die Prozessparameter Kunststoffschmelztemperatur ( $T_{KS}$ ) und die Werkzeugtemperatur ( $T_W$ ) die thermischen Rahmenbedingungen ab, während die Einspritzgeschwindigkeit ( $v_{Ein}$ ) und der Nachdruck ( $p_N$ ) die Strömungsbedingungen repräsentieren. Mit der Variation dieser Parameter wird zusätzlich der Einfluss von Verzug des Kunststoffträgers auf die realisierbare Leiterbahnlänge deutlich.

In Bild 3 ist die mittlere Leiterbahnlänge in Abhängigkeit der spritzgießseitigen Prozesseinstellungen bei konstanten Druckgießparametern für alle drei Kunststoffe dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass jeder Prozessparameter einen signifikanten Effekt auf die Leiterbahnlänge hat. So bedingt eine erhöhte Einspritzgeschwindigkeit eine längere Leiterbahn (außer bei Makrolon TC210), wohingegen bei allen anderen Prozessparametern ein gegenteiliger Effekt festzustellen ist. Eine Abnahme der Kunststoffschmelze- und Werkzeugtemperatur sowie des Nachdrucks innerhals des untersuchten Prozessfensters begünstigt somit eine längere Leiterbahn. Der ermittelte Effekt für die Einspritzgeschwindigkeit variiert bei den restlichen Versuchsreihen bei unterschiedlichen Druckgießparametern für alle Kunststoffträgermaterialien. Daher ist kein deutlicher Einfluss der Einspritzgeschwindigkeit der Kunststoffschmelze erkennbar.

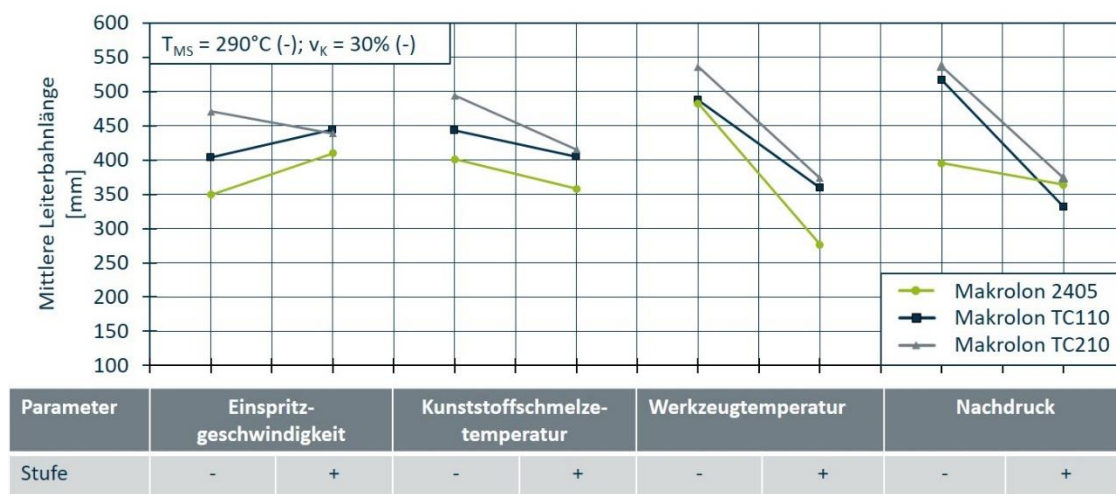


Bild 3: Einfluss der Spritzgießversuchsparameter auf die realisierbaren Leiterbahnlängen

Abkürzungen:  $T_{MS}$ : Schmelztemperatur der metallischen Schmelze;  $v_K$ : Kolbengeschwindigkeit

Eine mögliche Erklärung für die längere Leiterbahn bei geringer Schmelztemperatur des Kunststoffes könnte der Verzug sein. Bei hohen Schmelztemperaturen ist der Temperaturgradient zum Werkzeug wesentlich höher, was zu einer erhöhten Wärmeleitung führt. Der Teil des Kunststoffträgers entlang der Leiterbahnnut erstarrt durch die geringere Wandstärke somit früher, während die dickeren Wandbereiche des Kunststoffträgers noch schmelzeförmig sind. Somit kühlen die Bereiche entlang der Nut schneller als am restlichen Bauteil ab. Dieser inhomogene Erstarrungsprozess führt dazu, dass bei hohen Kunststoffschmelztemperaturen das Bauteil entlang der Nut verzieht und eine Durchbiegung (Verzug) erfährt [26, 27]. Ein verzogenes Bauteil kann im nachgeschalteten Druckgießprozess mit höherem Aufwand in der dafür vorgesehenen Kavität platziert werden. Dies führt dazu, dass die Position der Leiterbahnnut vom Anguss der metallischen Schmelze abweicht und eine Füllung dieser Nut nicht mehr ohne weiteres möglich ist. Der gleiche Zusammenhang gilt für die Werkzeugtemperatur [26, 27]. Auch hier ist bei geringeren Temperaturen eine Zunahme der Leiterbahnlänge festzustellen.

Ein hoher Nachdruck hat ebenfalls einen negativen Einfluss auf die Leiterbahnlänge. Der Grund dafür liegt in der erschwerten Entformung des Bauteils durch einen zu hohen Nachdruck, da Polycarbonat bei hohen Drücken zu hohen inneren Spannungen neigt, wodurch Entformungsproblemen auftreten [28]. Die Auswerfer können das Bauteil nicht einwandfrei entformen und verformen somit das Bauteil. Die entsprechende Biegung sorgt für die zuvor beschriebenen Probleme beim Druckgießen [27, 29].

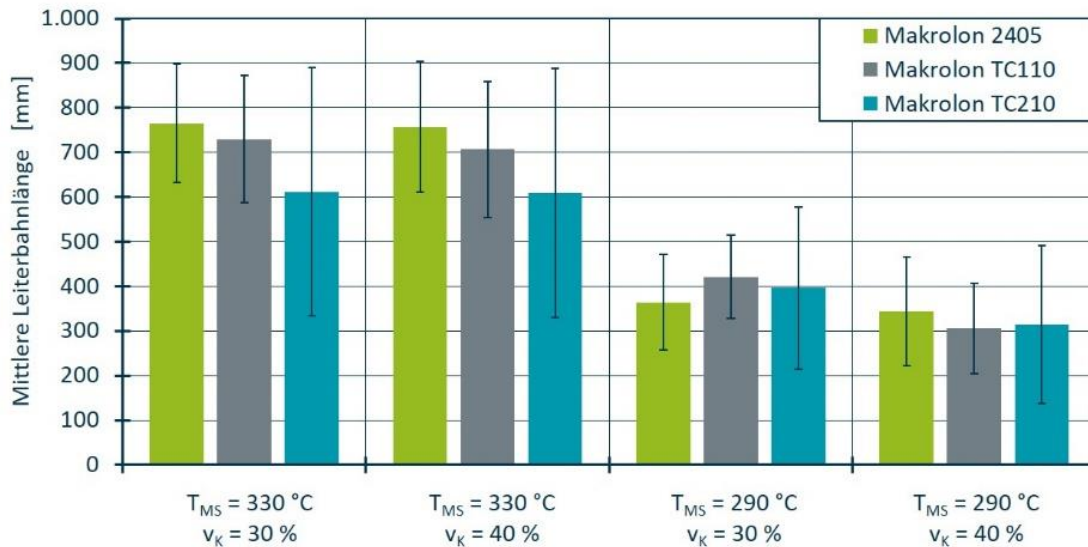
Das beschriebene Phänomen bestätigt sich für alle drei Materialien und gilt somit für die Prozessführung bei der Herstellung von Kunststoffträgern im IMKS. Somit sollte beim Spritzgießprozess ein niedriger Nachdruck und eine niedrigere Masse- und Werkzeugtemperatur eingestellt werden, um den Verzug entlang der Leiterbahnnut zu vermeiden und damit die Weiterverarbeitung zu optimieren.

#### **4.1.2 Ergebnisse der druckgießseitigen Parametervariation**

Um den Einfluss der Druckgießparameter zu untersuchen, werden die Kunststoffe jeweils als konstanter Parameter betrachtet. Dadurch wird der Druckgießversuchsplan anhand von drei Versuchsreihen (einer je Kunststoff mit jeweils 75 vermessenen Probekörpern) ausgewertet.

In Bild 4 sind die mittleren Leiterbahnlängen in Abhängigkeit der Druckgießparameter für alle drei Kunststoffe dargestellt. Eine eindeutige Aussage über den Effekt der Kolbengeschwindigkeit über alle Versuchsreihen hinweg ist nicht möglich, da für Makrolon 2405 und Makrolon TC210 keine signifikanten Haupteffekte vorliegen. Demnach ist kein Einfluss der Kolbengeschwindigkeit außerhalb der Normalverteilung zu erkennen. Die längsten Leiterbahnen weisen bei allen Kunststoffen die Probekörper auf, welche mit einer hohen Schmelztemperatur des Lots hergestellt wurden. Daher bedingen hohe Schmelztemperaturen des Lots längere Leiterbahnen, da der Erstarrungsprozess im Vergleich zu niedrigen Schmelztemperaturen länger dauert und die Nut durch die flüssige Schmelze weiter gefüllt wird. Gegensätzliches Verhalten

kann dementsprechend bei niedrigerer Schmelztemperatur des Lots detektiert werden.



**Bild 4:** Einfluss der Druckgießparameter auf die realisierbaren Leiterbahnlängen für jeden Kunststoff

Abkürzungen:  $T_{MS}$ : Schmelztemperatur der metallischen Schmelze;  
 $v_K$ : Kolbengeschwindigkeit

Hinsichtlich der verschiedenen Kunststoffe zeigt sich vor allem für die Versuchspunkte mit hoher Schmelztemperatur des Lots eine Abnahme der Leiterbahnlänge mit Zunahme der Wärmeleitfähigkeit des Kunststoffes. Somit weist Makrolon 2405 die höchste Leiterbahnlänge auf, während bei Makrolon TC210, welches die höchste Wärmeleitfähigkeit aufweist, die niedrigsten Leiterbahnlängen gemessen wurden. Die Wärmeleitfähigkeit des Kunststoffträgers hat demnach einen negativen Einfluss auf die Leiterbahnlängen, da die schnellere Wärmeabfuhr aus der Metallschmelze über den Träger die weitere Füllung der Leiterbahnnut erschwert.

#### 4.1.3 Zwischenfazit

Zusammenfassend zeigt sich, dass eine höhere Wärmeleitfähigkeit der Kunststoffe einen negativen Effekt auf die resultierende Leiterbahnlänge hat. Trotzdem können mit Makrolon TC110 und Makrolon TC210 lange Leiterbahnlängen von bis zu 800 mm realisiert werden. Somit existiert zwar ein Zusammenhang zwischen kürzeren Leiterbahnlängen und der Wärmeleitfähigkeit der Trägermaterialien, dessen schlussendliche Auswirkung als gering anzusehen ist und wärmeleitfähige Kunststoffe dennoch im Zusammenhang mit dem IMKS genutzt werden können. Beide thermisch leitfähigen Kunststoffe eignen sich demnach unter diesen Aspekten für das IMKS, da alle gängigen Leiterbahnlängen in der E/E-Industrie abgedeckt werden [20].

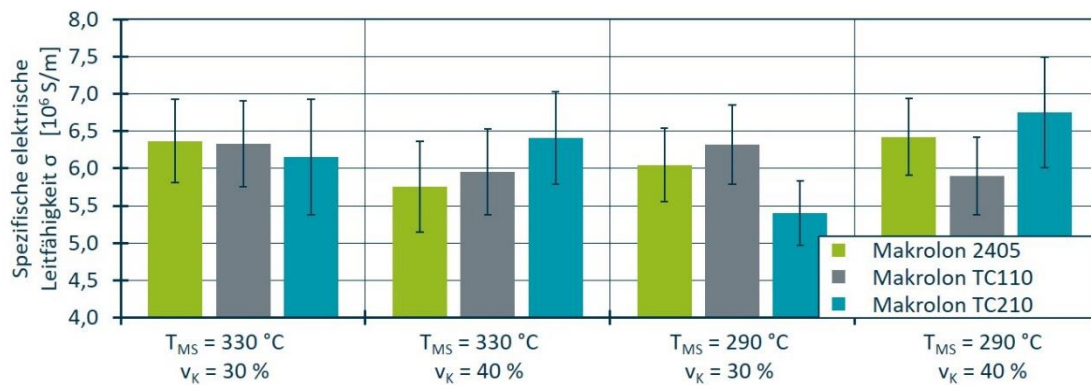
Es konnten sowohl druckgieß- als auch spritzgießseitige Empfehlungen bezüglich der Prozessführung zur Realisierung von langen Leiterbahnlängen abgeleitet werden. So bedingen hohe Schmelzetemperaturen des metallischen Lots lange Leiterbahnen, wohingegen für die Kolbengeschwindigkeit kein klarer Effekt ermittelt werden konnte. Spritzgießseitig haben alle Parameter einen Effekt. Dabei zeigen sich niedrige Werkzeug- und Kunststoffschmelzetemperaturen, sowie ein geringer Nachdruck erfolgsversprechend, um Verzug entlang der Leiterbahnnut zu verhindern.

## **4.2      Einfluss der Material- und Prozessparametervariation auf die spezifische elektrische Leitfähigkeit**

Im Rahmen dieses Kapitels wird der Einfluss der spritzgießseitigen Parameter vernachlässigt, da die spezifische elektrische Leitfähigkeit eine Materialeigenschaft der Zinn-Legierung ist. Folglich werden nur Ergebnisse des druckgießseitigen Versuchsplans dargestellt. Zunächst erfolgt eine Betrachtung der Leitfähigkeit am Leiterbahnbeginn, bevor anschließend ein Vergleich dieser mit der Leitfähigkeit am Leiterbahnde erfolgt, um potenzielle Unterschiede zu detektieren.

### **4.2.1      Einfluss der druckgießseitigen Parameter auf die Leitfähigkeit am Leiterbahnbeginn**

Bild 5 zeigt die Mittelwerte der druckgießseitigen Versuchspunkte für jeden Kunststoff. Die ermittelten Werte befinden sich im Bereich zwischen  $\sigma = 5,40 \cdot 10^6$  S/m und  $\sigma = 6,76 \cdot 10^6$  S/m. Da die Mittelwerte der Leitfähigkeit pro Druckgießversuchspunkt innerhalb der drei Trägermaterialien unterschiedlich stark streuen, ist daraus kein deutlicher Einfluss der Wärmeleitfähigkeit der Kunststoffe auf die elektrische Leitfähigkeit der Leiterbahn zu erkennen. Daraus resultiert, dass Makrolon TC110 und Makrolon TC210 wie das Referenzmaterial hinsichtlich der elektrischen Leitfähigkeit der Leiterbahn gleichermaßen beim Druckgießen verwendet werden können. Unabhängig von den Mittelwerten konnten mit allen Materialien Leitfähigkeiten im Bereich von  $7,05$  bis  $7,40 \cdot 10^6$  S/m realisiert werden, was dem üblichen Leitfähigkeitswert des Sn100Ni+ entspricht [24]. Damit sind alle drei verwendeten Kunststoffträgermaterialien in Kombination mit dem Sn100Ni+ kompatibel und demnach für das IMKS geeignet.



**Bild 5:** Spezifische elektrische Leitfähigkeit am Leiterbahnbeginn

Abkürzungen: T<sub>MS</sub>: Schmelztemperatur der metallischen Schmelze;  
v<sub>K</sub>: Kolbengeschwindigkeit

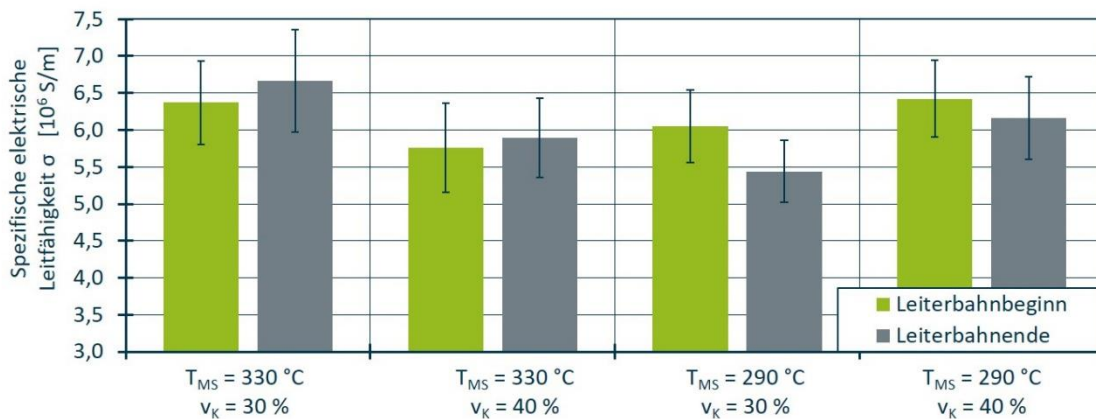
Nach anschließender statistischer Auswertung der Parameter zeigt lediglich die Kolbengeschwindigkeit einen signifikanten Effekt bei allen drei Kunststoffen. Bei Makrolon 2405 und Makrolon TC110 hat eine Erhöhung der Kolbengeschwindigkeit einen negativen Effekt auf die spezifische elektrische Leitfähigkeit der Leiterbahn. Ein möglicher Erklärungsansatz liegt in der durch hohe Kolbengeschwindigkeiten entstehenden Strömungsbedingung. Basierend auf vorangegangenen Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass bei der metallischen Schmelze turbulente Strömungsbedingungen vorliegen, wodurch die Entstehung von Lufteinschlüssen begünstigt wird [8, 25]. Diese führen zu einer Reduktion der elektrischen Leitfähigkeit der Leiterbahn und beeinträchtigen zudem die mechanischen Eigenschaften der Leiterbahn. Bei Makrolon TC210 hat eine Erhöhung der Kolbengeschwindigkeit dagegen einen positiven Effekt auf die spezifische elektrische Leitfähigkeit. Demnach können bei diesem Material höhere Kolbengeschwindigkeiten als bei den anderen beiden Kunststoffen verwendet werden. Grund für diese unterschiedlichen Wirkungsweisen der Kolbengeschwindigkeit kann die höhere Wärmeleitfähigkeit des Makrolon TC210 sein. Durch eine bessere Wärmeabfuhr beim Einspritzprozess kühlt die Metallschmelze schneller ab und wird damit über den Abkühlprozess schneller hochviskos. Demnach sollte die Neigung zu turbulenten Strömungen bei Makrolon TC210 als Trägermaterial aufgrund der schnelleren Abkühlung beim Einspritzvorgang – verglichen mit Makrolon 2405 – weniger stark ausgeprägt sein.

Ein deutlicher Einfluss auf die spezifische elektrische Leitfähigkeit bedingt durch die wärmeleitfähigen Kunststoffe ist demnach nicht zu identifizieren. Weiterhin konnte keine signifikante Veränderung der Leitfähigkeitswerte durch unterschiedliche Trägermaterialien festgestellt werden, sodass beide wärmeleitfähigen Trägermaterialien auch im IMKS einsetzbar sind.



#### 4.2.2 Vergleich der Leitfähigkeit zwischen Leiterbahnbeginn und -ende

Aufbauend auf den Messungen der spezifischen elektrischen Leitfähigkeiten am Leiterbahnbeginn wird diese auch am Leiterbahnende ermittelt, sodass Rückschlüsse hinsichtlich des Einflusses längerer Leiterbahnstrukturen auf die Leitfähigkeit gezogen werden können. In Bild 6 ist der Vergleich der Leitfähigkeit zwischen Leiterbahnbeginn und -ende für jeden druckgießseitigen Versuchspunkt exemplarisch für Makrolon TC210 dargestellt. Die Leitfähigkeit ist bei Versuchspunkten mit hohen Schmelztemperaturen des Lots am Leiterbahnende besser als am -beginn. Bei niedrigen Schmelztemperaturen zeigt sich ein Leitfähigkeitsabfall zum Leiterbahnende. Dies ist auch im Zusammenhang mit Makrolon TC110 und Makrolon 2405 zu erkennen.



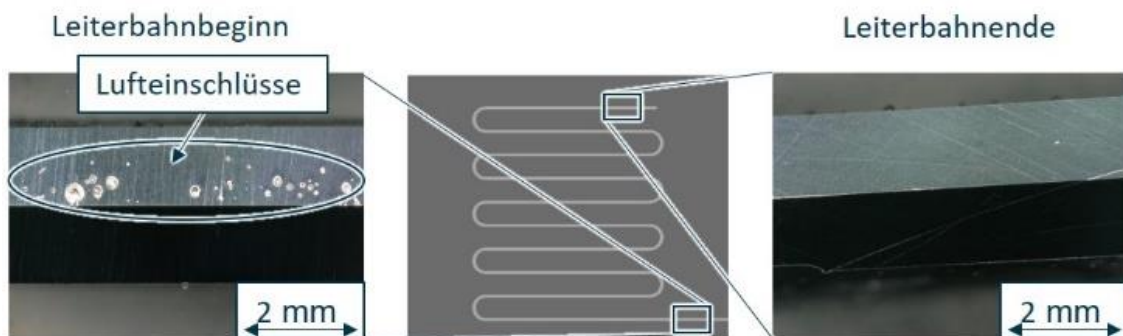
**Bild 6:** Vergleich der Leitfähigkeit zwischen Leiterbahnbeginn und -ende bei Makrolon TC210 als Trägermaterial

Abkürzungen:  $T_{MS}$ : Schmelztemperatur der metallischen Schmelze;  
 $v_K$ : Kolbengeschwindigkeit

Somit führen hohe Schmelztemperaturen des Lots und niedrige Kolbengeschwindigkeiten zu einer höheren Leitfähigkeit am Leiterbahnende. Bei niedrigen Schmelztemperaturen ist das gegenteilige Phänomen zu sehen. Eine mögliche Erklärung dafür ist die einhergehende komplette Füllung der Leiterbahnnut. Da die Schmelze vom Lot bei kompletter Füllung noch nicht erstarrt ist, wird weiter Schmelze in die Nut transportiert. Dadurch kann eingeschlossene Luft am Leiterbahnende entweichen, und es entstehen weniger Fehlstellen. Hingegen wird am Leiterbahnbeginn weiter Luft durch die nachströmende Schmelze transportiert und eingeschlossen. Grund dafür ist die nicht ausreichend inerte Umgebung des Aggregats. Bei einer nicht vollständigen Füllung kann die durch die Metallschmelzefront eingeschlossene Luft nicht durch nachfließende Schmelze entweichen und wird beim Erstarrungsprozess demnach eingeschlossen.



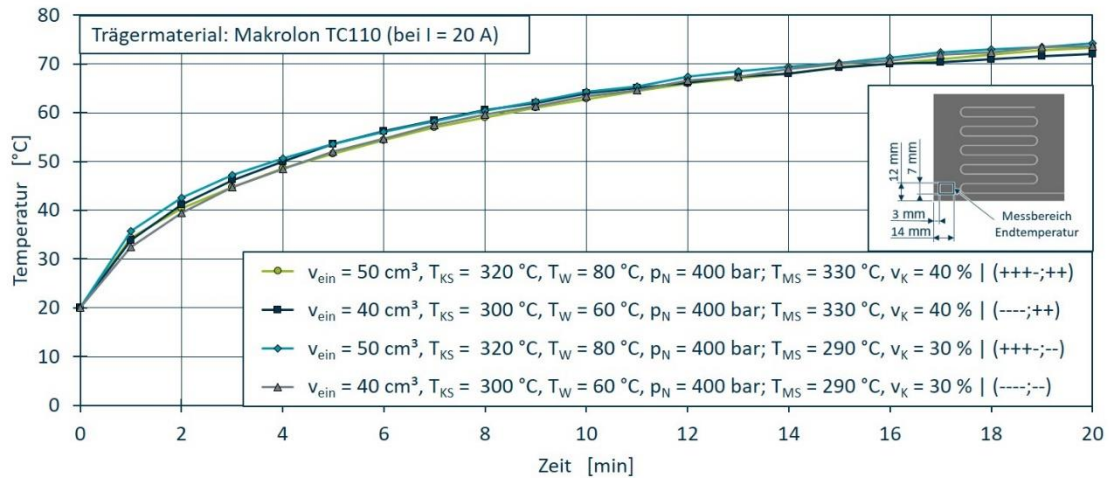
Diese Überlegungen stützen Mikroskopieaufnahmen von vollständig gefüllten Leiterbahnnuten, Bild 7. Es sind weniger Luft einschüsse am Leiterbahnde als am -anfang zu erkennen, was ein Indikator für eine bessere Leitfähigkeit am Ende der Leiterbahn ist. Somit herrscht ein erkennbarer Zusammenhang zwischen Leitfähigkeit entlang der Leiterbahn und Füllung der Nut.



*Bild 7: Mikroskopieaufnahmen: Vergleich Leiterbahnbeginn und -ende bei volumetrisch vollgefüllten Leiterbahnen bei Makrolon 2405*

### **4.3 Einfluss der Material- und Prozessparametervariation auf die Bauteilerwärmung aufgrund einer Strombeaufschlagung**

Nachfolgend werden einzelne aussagekräftige Versuchspunkte für die Untersuchungen der Bauteilerwärmung durch eine Strombeaufschlagung ausgewählt. Zunächst werden für jeden Kunststoff die sich nach 20 Minuten einstellenden Bauteilmaximaltemperaturen bei den vier betrachteten Versuchspunkten gegenübergestellt. Bild 8 zeigt entsprechende Temperaturverläufe beispielhaft für Makrolon TC110. Es zeigt sich, dass die gemessene Temperatur bei jedem Kunststoff innerhalb der gewählten Versuchspunkte nur minimal variiert, sodass ein Einfluss der der Verarbeitungsparameter offenbar nicht vorliegt.



**Bild 8:** Temperaturverlauf an der Trägerplatte bei konstanter Strombelastung für Makrolon TC110

Abkürzungen:  $v_{\text{Ein}}$ : Einspritzgeschwindigkeit;  
 $T_{\text{KS}}$ : Kunststoffschmelzetemperatur;  $T_{\text{WZ}}$ : Werkzeugtemperatur;  
 $p_{\text{N}}$ : Nachdruck;  $T_{\text{MS}}$ : Schmelzetemperatur der metallischen Schmelze;  
 $v_{\text{K}}$ : Kolbengeschwindigkeit

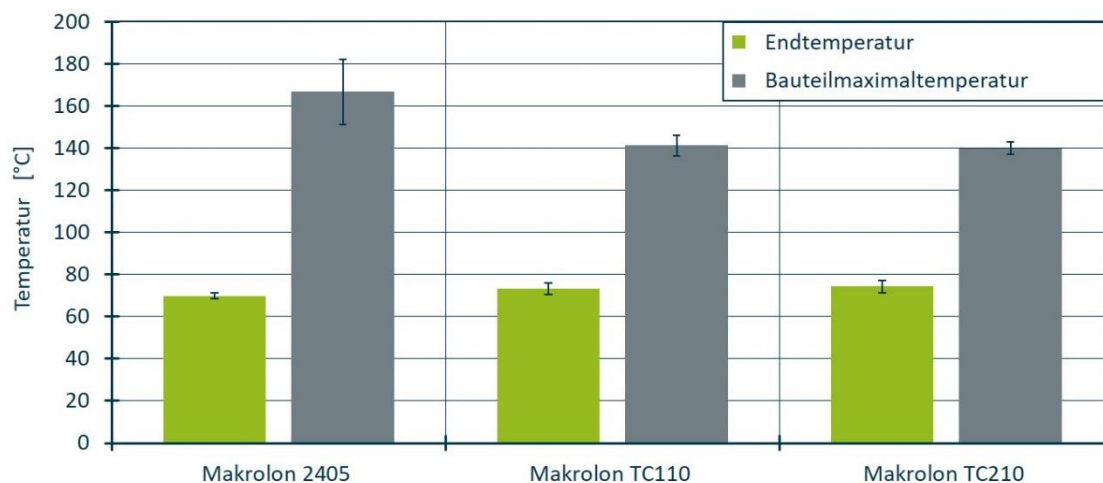
Anschließend werden die gleichen Versuchspunkte der unterschiedlichen Kunststoffe gegenübergestellt. Bild 9 zeigt exemplarisch den Vergleich der Bauteilmaximal- und Endtemperaturen am geprüften Punkt für alle Materialien anhand eines konstanten Versuchspunkts. Die Bauteilmaximaltemperaturen sind über den kompletten Probekörper, bestehend aus Kunststoffträger und Leiterbahn, ermittelt worden. Die Endtemperaturen sind dagegen jeweils an einer definierten Stelle am Kunststoffträger gemessen worden. Die Bauteilmaximaltemperaturen befinden sich in einem Bereich zwischen 140 °C - 166 °C. Durch die anschließende Sichtprüfung konnten trotz der hohen Temperaturen, hervorgerufen durch die Belastung durch den Strom, keine Beschädigungen am Materialverbund festgestellt werden.

Auffällig ist die Abnahme der Bauteilmaximaltemperatur in Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit der Kunststoffe. Makrolon TC210 weist mit der höchsten Wärmeleitfähigkeit die niedrigste Bauteilmaximaltemperatur (139,9 °C) auf, während das nicht wärmeleitfähige Makrolon 2405 eine Bauteilmaximaltemperatur von 166 °C erreicht. Ein Wärmeabtransport durch die wärmeleitfähigen Kunststoffe wird bei der Betrachtung der entsprechenden Endtemperaturen deutlich. Trotz der geringsten Bauteilmaximaltemperatur weist Makrolon TC210 die höchste Endtemperatur von 74,2 °C auf. Die gemessene Endtemperatur nach 20 Minuten ist bei Makrolon 2405 mit 69,8 °C trotz der höchsten Bauteilmaximaltemperatur am geringsten. Dies ist auf die geringere Wärmeleitfähigkeit des Materials im Vergleich zu den anderen beiden Kunststoffen zurückzuführen. Die Ergebnisse zeigen zudem eine Abhängigkeit

der maximalen Bauteilerwärmung von der Leiterbahnlänge. Mit zunehmender Leiterbahnlänge steigt auch die maximale Bauteilerwärmung.

Bei Makrolon TC110 und Makrolon TC210 erfolgt demnach ein Wärmeabtransport von den Leiterbahnen auf den Kunststoffträger. So wird bei den Probekörpern aus Makrolon TC110 eine Abnahme der Maximaltemperatur um 15,3 % im Vergleich zu Makrolon 2405 festgestellt. Dieser Trend wird beim wärmeleitfähigeren Makrolon TC210 leicht verstärkt; bei diesem wird ein Abfall der Maximaltemperatur von 16,1 % gegenüber dem Referenzmaterial deutlich. Ein Unterschied zwischen Makrolon TC110 und Makrolon TC210 ist demnach vorhanden, jedoch ist dieser auf einem ähnlichen Niveau, weshalb für die Wärmeabfuhr beide Materialien gleichermaßen geeignet sind.

Die Wärmeleitfähigkeit von Makrolon TC110 und Makrolon TC210 führt zu einer geringeren Bauteilerwärmung durch Strombelastung und kann demnach besser für Anwendungen im E/E-Bereich eingesetzt werden als das Referenzmaterial. Somit kann die Leiterbahntemperatur durch die die Wärmeabfuhr über die Trägermaterialien gesenkt und das Überhitzen von E/E-Komponenten verringert werden.



**Bild 9:** Vergleich der Bauteilmaximal- und Endtemperaturen  
(Versuchspunkt:  $v_{Ein} = 50 \text{ °C}$ ,  $T_{KS} = 300/320 \text{ °C}$ ,  $T_{WZ} = 80 \text{ °C}$ ,  
 $p_N = 400 \text{ bar}$ ;  $T_{MS} = 330 \text{ °C}$ ,  $v_K = 40 \text{ %}$ )

Abkürzungen:  $v_{Ein}$ : Einspritzgeschwindigkeit;  
 $T_{KS}$ : Kunststoffschmelzetemperatur;  $T_{WZ}$ : Werkzeugtemperatur;  
 $p_N$ : Nachdruck;  $T_{MS}$ : Schmelzetemperatur der metallischen Schmelze;  
 $v_K$ : Kolbengeschwindigkeit

## 5      FAZIT UND AUSBLICK

Die durchgeführten Untersuchungen zum Integrierten Metall/Kunststoff-Spritzgießen im Zusammenhang mit wärmeleitfähigen Kunststoffen zeigen, dass eine Eignung dieser vorliegt und unter den geprüften Aspekten mit dem Referenzmaterial vergleichbare oder bessere Bauteileigenschaften realisierbar sind. Demnach lassen sich die Forschungsfragen folgendermaßen beantworten:

*Lassen sich IMKS-Bauteile grundlegend mit wärmeleitfähigen Kunststoffen realisieren?* Die Untersuchungen zeigen, dass wärmeleitfähige Kunststoffe mit dem IMKS grundsätzlich kompatibel sind. Es lassen sich grundlegend IMKS-Bauteile mit wärmeleitfähigem Trägermaterial herstellen, ohne das ein signifikanter Einfluss auf die spezifische elektrische Leitfähigkeit, die realisierbare Leiterbahnlänge oder die Stromtragfähigkeit des Bauteils zu erhalten.

*Welchen Einfluss haben wärmeleitfähige Kunststoffe auf die resultierende Leiterbahnlänge?* Durch die Analysen zu den Parameter- und Materialeinflüssen auf die realisierbaren Leiterbahnlängen wurden wichtige Erkenntnisse und Empfehlungen hinsichtlich der Prozessführung während der Verarbeitung von wärmeleitfähigen Kunststoffen abgeleitet. Dabei haben spritzgießseitig die Kunststoffschmelze- und Werkzeugtemperatur, die Einspritzgeschwindigkeit sowie der Nachdruck einen Einfluss auf die resultierende Leiterbahnlänge. So haben hohe thermische Randbedingungen sowie ein hoher Nachdruck einen negativen Effekt auf die realisierbare Leiterbahnlänge. Zudem erhöhen diese den Verzug des Kunststoffträgers, was vermieden werden sollte, da eine exakte Positionierung in der zweiten Kavität zum Druckgießen erschwert wird. Druckgießseitig weisen hohe Schmelzetemperaturen des Lots einen positiven Einfluss auf die Leiterbahnlänge auf, da der Einspritzprozess nicht durch eine verfrühte Erstarrung der Schmelze abgebrochen wird. Der Einfluss der Wärmeleitfähigkeit des Trägermaterials auf die Leiterbahnlänge ist dagegen nur geringfügig, weshalb Makrolon TC110 und Makrolon TC210 gleichermaßen für die Realisierung von langen Leiterbahnen geeignet sind [20].

*Welche elektrischen Eigenschaften lassen sich durch das IMKS im Zusammenhang mit thermisch leitfähigen Kunststoffen realisieren?* Die Untersuchungen zeigen, dass trotz erhöhter Leiterbahnlängen die für Sn100Ni+ übliche spezifische elektrische Leitfähigkeit realisierbar ist. Damit werden die für das IMKS üblichen Leitfähigkeitswerte mit den wärmeleitfähigeren Materialien erreicht [2, 11]. Eine signifikante Veränderung der Leitfähigkeitswerte durch unterschiedliche Trägermaterialien konnte nicht festgestellt werden. Hingegen haben hohe Kolbengeschwindigkeiten einen negativen Einfluss auf die Leitfähigkeit, welche durch Lufteinschlüsse infolge von turbulenten Einstrombedingungen bedingt ist. Die Prozessführung für Makrolon TC210 kann mit höheren Schmelzetemperaturen des Lots und Kolbengeschwindigkeiten erfolgen, da es zu einer schnelleren Erstarrung der Schmelze und einer daraus resultierenden geringeren Neigung zur turbulenten Strömungen kommt. Bei komplett gefüllten langen Leiterbahnen wird weiterhin eine höhere Leitfähigkeit

am Leiterbahnende festgestellt, da die eingeschlossene Luft am Leiterbahnende durch nachströmende Metallschmelze verdrängt wird.

Bei den Stromtragfähigkeitsmessungen zeigen die Prozessparameter keinen Einfluss auf die Erwärmung des Bauteils. Es zeigt sich lediglich eine Abhängigkeit der maximalen Bauteilerwärmung von der Leiterbahnlänge. Makrolon TC110 und Makrolon TC210 erwärmen sich weniger im Vergleich zu Makrolon 2405 und eignen sich demnach besser für Anwendungen bei einer vergleichsweise hohen Strombelastung. Hinsichtlich der Bauteilerwärmung können wärmeleitfähige Trägermaterialien einen vorteilhafteren Wärmehaushalt im IMKS hervorbringen als nicht wärmeleitfähige Trägermaterialien.

Nachfolgende Untersuchungen zum IMKS mit wärmeleitfähigen Kunststoffen sollten die Reduzierung der Lufteinschlüsse und damit die Erhöhung der spezifischen Leitfähigkeit der Leiterbahn als Ziel haben. Eine Entlüftung mit reduzierter Schließkraft reicht nicht aus, um Lufteinschlüsse komplett zu vermeiden. Zur Realisierung einer besseren Entlüftung können dynamische Formentlüftungsventile entlang der Leiterbahnnut eingesetzt werden. Diese erlauben das Entweichen der Luft bis zum Zeitpunkt, an dem das Ventil durch die Metallschmelze automatisch verschlossen wird.

## **6            DANKSAGUNG**

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 13N14627 gefördert. Dem BMBF gilt unser Dank. Die Autoren bedanken sich außerdem bei den Unternehmen Covestro AG, Leverkusen, Deutschland, Felder GmbH Löttechnik, Oberhausen, Deutschland, Heinze Kunststofftechnik GmbH & Co. KG, Herford, Deutschland und Mentor GmbH & Co. Präzisions-Bauteile KG, Erkrath, Deutschland, für die Unterstützung und die Bereitstellung von Versuchsmaterialien.

## Literatur

- [1] Bobzin, K.;  
Bührig-Polazcek,  
A.;  
Haberstroh, E.;  
et al.      Verkürzung der Prozessketten bei der Herstellung  
von Kunststoff/Metall-Hybriden durch neuartige  
Urform- und Fügeprozesse  
In: Brecher, C. (Hrsg.): Integrative  
Produktionstechnik für Hochlohnländer  
Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2011  
DOI: 10.1007/978-3-642-20693-1
- [2] Neuß, A.      Verfahrensentwicklung des hybriden  
Mehrkomponenten-Spritzgießens zur Herstellung  
von Bauteilen für Elektro- und  
Elektronikanwendungen  
Dissertation am Institut für Kunststoffverarbeitung,  
RWTH Aachen, 2014
- [3] Diebold, K.      Effizienz in 3-D  
Plastverarbeiter 58 (2007) 6, S. 22 - 24
- [4] Eyerer, P.      Oberflächentechnologie für Kunststoffbauteile  
In: Schüle, H., Eyerer, P. (Hrsg): Polymer  
Engineering 2  
Springer Vieweg, Berlin, 2020  
DOI: 10.1007/978-3-662-59841-2
- [5] Johannaber, F.;  
Michaeli, W.      Handbuch Spritzgießen  
Carl Hanser Verlag, München, Wien, 2004  
DOI: 10.3139/9783446440982
- [6] Wuchter, M.      Thermisch stabil und wärmeleitfähig  
Kunststoffe 105 (2015) 6, S. 88 - 91
- [7] Hopmann, C.;  
Bobzin, K.;  
Schoeldgen, R.;  
et al.      IMKS and IMMS: two methods for the production of  
plastic parts featuring metallic areas  
Journal of Polymer Engineering 35 (2015) 6, S. 1 - 8  
DOI: 10.1515/polyeng-2014-0281
- [8] Hopmann, C.;  
Sturm, I.      Langzeitbeständige Leiterbahnen -  
Prozesssimulationen zum Optimieren des  
Integrierten Metall/Kunststoff-Spritzgießens  
Plastverarbeiter 70 (2019) 10, S. 96 - 99

- [9] Hopmann, C.; Sturm, I. Kontaktierungen mit dem Integrierten Metall/Kunststoff-Spritzgießen - die Gestaltung ist entscheidend  
Plastverarbeiter 71 (2020) 12, S. 96 - 99
- [10] Schramm, R. Strukturierung und Metallisierung  
In: Franke, J. (Hrsg.): Räumliche elektronische Baugruppen (3D-MID) - Werkstoffe, Herstellung, Montage und Anwendungen für spritzgegossene Schaltungsträger  
Carl Hanser Verlag, München, 2013  
DOI: 10.3139/9783446437784
- [11] Wunderle, J. Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer: Hybrides Mehrkomponenten-Spritzgießen  
Umdruck zur IKV-Fachtagung: Kunststoff und Metall im Verbund - Entwicklungsperspektiven für Hybridanwendungen, Aachen, 2011
- [12] Doriat, C. Lösungen mit Grip und mit Grips  
Kunststoffe 105 (2015) 11, S. 29 - 31
- [13] Hopmann, M.; Michaeli, W. Einführung in die Kunststoffverarbeitung  
Carl Hanser Verlag, München, Wien, 2015  
DOI: 10.3139/9783446446281
- [14] Engelkraut, S.; Zeltner, S.; März, M.; et al. Wärmeleitfähige Kunststoffe für Entwärmungsaufgaben  
Fraunhofer-Institut für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie IISB, 2008
- [15] Grundler, M.; Reich, T.; Derieth, T.; et al. Entwicklung von hochwärmeleitfähigen Polymer-Compounds  
Zentrum für BrennstoffzellenTechnik (ZBT) GmbH, Hochschule Darmstadt FB Maschinenbau und Kunststofftechnik, 2014
- [16] Grundler, M.; Stannek, P.; Derieth, T.; et al. Hochwärmeleitfähige Polymer-Compounds  
Zentrum für BrennstoffzellenTechnik (ZBT) GmbH, 2015

- [17] Hsissou, C.; Seghiri, R.; Benzekri, Z.; et al. Polymer composite materials: A comprehensive review  
Composite Structures 262 (2021) 8, S. 54 - 92  
DOI: 10.1016/j.compstruct.2021.113640
- [18] Dörner, J. Spritzgießen elektrisch leitfähiger Thermoplaste –  
Prozesstechnik und Modellbildung  
Dissertation am Lehrstuhl für Konstruktion und Kunststoffmaschinen, Universität Duisburg-Essen, 2012
- [19] Kleppmann, W. Versuchsplanung - Produkte und Prozesse  
optimieren  
Carl Hanser Verlag, München, Wien, 2011  
DOI: 10.3139/9783446429420
- [20] Bingöl, B. Persönliche Mitteilung  
Mentor GmbH & Co. Präzisions-Bauteile KG,  
Erkrath, 30.06.2021
- [21] N.N. Materialdatenblatt: Makrolon TC110  
Covestro Deutschland AG, Leverkusen, 2018
- [22] N.N. Materialdatenblatt: Makrolon 2405  
Covestro Deutschland AG, Leverkusen, 2019
- [23] N.N. Materialdatenblatt: Makrolon TC210  
Covestro Deutschland AG, Leverkusen, 2020
- [24] N.N. Materialdatenblatt: ISO-Tin „Sn100Ni+“  
FELDER GmbH Löttechnik, Oberhausen, 2021
- [25] Hopmann, C.; Ochotta, P.; Haase, S.; Fehlerfreie Leiterbahnen mit hoher Lebensdauer  
Kunststoffe 107 (2017) 3, S. 99 - 103
- [26] N.N. Konstruktionsratgeber: Konstruktion & Verarbeitung  
von Kunststoffen  
DuPont de Nemours (Deutschland) GmbH, Neu-  
Isenburg, 2014
- [27] N.N. Verarbeitungsbroschüre: Verarbeitungsdaten für den  
Spritzgießer  
Lanxess AG, Köln, 2017



- [28] Bichler, M.                      Kunststoffteile fehlerfrei spritzgießen  
Hüthig GmbH, Heidelberg, 2007
- [29] N.N.                                Verarbeitungsratgeber: Spritzgussfehler bei  
technischen Thermoplasten. Ursache und Lösungen  
BASF SE, Ludwigshafen am Rhein, 2015

### **Bibliography**

DOI 10.3139/O999.01012023  
Zeitschrift Kunststofftechnik / Journal of Plastics  
Technology 19 (2023) 1; page 1–26  
© Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG  
ISSN 1864 – 2217

**Stichworte:**

**Spritzgießen**, Elektrische Eigenschaften, Mehrkomponenten-Spritzgießen, Statistische Versuchsplanung, Prozessanalyse, Wärmeleitung

**Keywords:**

**Injection moulding**, electrical properties, multi-component injection moulding, statistical design of experiments, process analysis, heat conduction

**Autor / author**

Ingrid Sturm, M.Sc.  
Prof. Dr.-Ing. Christian Hopmann  
Cihan Koyuncu, B.Sc.

E-Mail: [ingrid.sturm@ikv.rwth-aachen.de](mailto:ingrid.sturm@ikv.rwth-aachen.de)  
Webseite: [www.ikv-aachen.de](http://www.ikv-aachen.de)  
Tel.: +49 (0)241/80-93978

Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV) in Industrie  
und Handwerk an der RWTH Aachen  
Seffenter Weg 201  
52074 Aachen

**Herausgeber / Editors**

**Europa / Europe**

Prof. Dr.-Ing. habil. Bodo Fiedler  
Institut für Kunststoffe und Verbundwerkstoffe  
Technische Universität Hamburg  
Denickestr. 15 (K)  
21073 Hamburg  
Deutschland  
Tel.: +49 (0)40 42878 3038  
E-Mail: [fiedler@kunststofftech.com](mailto:fiedler@kunststofftech.com)

Prof. Dr.-Ing. Reinhard Schiffers  
Institut für Produkt Engineering  
Universität Duisburg-Essen  
Lotharstr. 1, MA 222  
47057 Duisburg  
Deutschland  
Tel.: +49 (0)203 379 2500  
E-Mail: [schiffers@kunststofftech.com](mailto:schiffers@kunststofftech.com)

**Amerika / The Americas**

Prof. Prof. hon. Dr. Tim A. Osswald  
Polymer Engineering Center, Director  
University of Wisconsin-Madison  
1513 University Avenue  
Madison, WI 53706  
USA  
Tel.: +1 608 263 9538  
E-Mail: [osswald@enr.wisc.edu](mailto:osswald@enr.wisc.edu)

**Verlag / Publisher**

Carl-Hanser-Verlag GmbH & Co. KG  
Jo Lendle, Oliver Rohloff  
Geschäftsführer  
Kolbergerstraße 22  
81679 München  
Germany  
Tel.: +49 (0)89 99830 0  
E-Mail: [info@hanser.de](mailto:info@hanser.de)

**Redaktion / Editorial Office**

Dr.-Ing. Eva Bittmann  
Janina Mittelhaus, M.Sc.  
E-Mail: [redaktion@kunststofftech.com](mailto:redaktion@kunststofftech.com)

**Beirat / Advisory Board**

Experten aus Forschung und Industrie, gelistet unter  
[www.kunststofftech.com](http://www.kunststofftech.com) / [www.plasticseng.com](http://www.plasticseng.com)