

Schlussbericht

Autoren:

Ingrid Sturm, M.Sc.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Hopmann

Jonas Gerads, M.Sc. RWTH

Datum: 31.05.2023

Verbundprojekt:	Integrierte Spritzgießtechnologie für LED-Lichtquellen mit Vorsatzoptik (ISI-LED)
Teilvorhaben:	Erforschung und Analyse der Einzelprozesse zur Herstellung eines LED-Beleuchtungssystems in einer Spritzgießfertigungszelle
Akronym:	ISI-LED
Ausführende Stelle:	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen - Lehrstuhl für Kunststoffverarbeitung
Förderkennzeichen:	13N14627
Laufzeit des Projekts:	01.12.2018 – 30.11.2022

Geldgeber



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Projektträger:



Technologiezentrum

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 Projektpartnern Covestro AG, Leverkusen, Innolite GmbH, Aachen, Heiform GmbH, Herford, Mentor GmbH & Co. Präzisions-Bauteile KG, Erkrath, sowie dem Unternehmen Felder GmbH Löttechnik, Oberhausen, und der Firma Röhm GmbH, Darmstadt, für die Unterstützung und die Bereitstellung von Versuchsmaterialien, der Firma Engel Austria GmbH, Schwertberg, Österreich und der Firma Motan Holding GmbH für die Bereitstellung von Versuchsanlagen.

Ein wesentlicher Teil der Ergebnisse wurde von Ingrid Sturm, M.Sc. (mit Fokus auf den Untersuchungen zum IMKS) und Jonas Gerads, M.Sc. RWTH (mit Fokus auf den Untersuchungen hinsichtlich der Optik) erarbeitet und teilweise von Studierenden der RWTH Aachen in Form von einer studentischen Arbeit niedergelegt. Diese Arbeiten sind nicht zur Veröffentlichung vorgesehen, können aber in der Bibliothek des Instituts für Kunststoffverarbeitung eingesehen werden.

Teil I: Kurzbericht

Zur Herstellung von LED-Beleuchtungssystemen sind viele aufwendige Einzelschritte wie die Gehäuseherstellung, die LED-Kontaktierung auf der Leiterplatine sowie die Montage einer Vorsatzoptik und eines Kühlkörpers notwendig, sodass die Produktion zunehmend in Niedriglohnländern stattfindet. Die lange Prozesskette bedingt zudem einen sehr hohen technischen, logistischen und zeitlichen Aufwand (bspw. durch Handling und Transport). Ferner sind zwischen den Prozessen viele Vor- und Nachbearbeitungsschritte notwendig, wodurch sich entlang der gesamten Prozesskette unterschiedliche Fehlerquellen ergeben [AM10, DS06, Kec12, Mal11]. Die Zielsetzung des Forschungsprojekts besteht daher in der Entwicklung und Validierung eines LED-Beleuchtungssystems, welches sich in einem hochintegrierten, hochautomatisierten und ressourcenschonenden Herstellungsprozess am Technologiestandort Deutschland fertigen lässt.

Durch die direkte Kombination innovativer Fertigungstechnologien und neuer Materialien sollen Prozessschritte eingespart werden. Dabei werden neuartige, elektrisch isolierende und thermisch leitfähige Kunststoffe als Gehäuse und gleichzeitig als Kühlkörper für das Beleuchtungssystem genutzt. In das dreidimensional geformte Gehäuse aus wärmeleitfähigem Kunststoff werden LED-Platinen und Kontaktstifte eingelegt und anschließend durch eine Leiterbahn, bestehend aus niedrigschmelzendem Lot, durch das integrierte Metall/Kunststoff-Spritzgießen (IMKS), kontaktiert. Durch die resultierende höhere Gestaltungsfreiheit bei der Positionierung von LED im Vergleich zu konventionellen Platinen, kann eine innovative optische Komponente mit Freiformgeometrie über der LED platziert und mediendicht umspritzt werden. Das am IKV entwickelte IMKS-Verfahren ermöglicht die Herstellung von Kunststoffbauteilen mit integrierten Leiterbahnen in einem Werkzeug auf einer Spritzgießmaschine [HS19, HS20]. Parallel dazu wird die lichtleitende Vorsatzoptik in einer weiteren Spritzgießmaschine innerhalb der Fertigungszelle hergestellt. Abschließend wird die Optik auf dem Gehäuse platziert und mediendicht mit dem Gehäusematerial umspritzt. Das fertige Beleuchtungssystem kann nach dem integrierten Prozess ohne Nachbearbeitungsschritte eingesetzt werden.

Generell lässt sich die Projektlaufzeit in vier Phasen, deren Arbeiten teilweise parallel stattfanden, einteilen. In Phase 1 ging es zunächst um die Materialauswahl und die Festlegung der Demonstratorgeometrie. Daneben unterstützte das IKV mittels Spritzgießsimulationen die Konzept- und Werkzeugentwicklung, wobei Prozessparameter und Angusspositionen variiert und so neben der Konstruktion auch eine Angusspositionsoptimierung durchgeführt wurde. Inhalt von Phase 2 waren ergänzende Untersuchungen an vereinfachten Probekörpern. Am IKV wurden im Rahmen dessen Grundlagenuntersuchungen an IMKS-Bauteilen sowie Untersuchungen zur der Mediendichtheit und Verbundfestigkeit der ausgewählten Optik- und Gehäusematerialien durchgeführt. In Phase 3 wurde der Demonstrator hergestellt und die Bauteile analysiert. Nach erfolgter Demonstratorherstellung (teilweise bei der Heiform GmbH, teilweise am IKV) wurden die Bauteile in verschiedene Analysen durch das IKV und Mentor GmbH geprüft. Im Rahmen von Phase 4 wurden Optimierungspotenziale durch die Partner ausgearbeitet und ein Ausblick gegeben.

Eine Auswahl an möglichen Materialien für die Optik und für das Gehäuse wurde im Projektkonsortium getroffen. Dabei wurden als mögliche optische Materialien ein Polycarbonat (PC, Makrolon LED2245 der Firma Covestro AG, Leverkusen) und ein Polymethylmethacrylat (PMMA, Plexiglas 7N der Firma Röhm GmbH, Darmstadt) definiert. Weiterhin wurden als potenzielle Gehäusematerialien verschiedene Polycarbonate ausgewählt. Dazu gehören neben einem Standardgehäusematerial, Makrolon 2405, auch thermisch die leitfähigen Kunststoffe aus PC, Makrolon TC110 und Makrolon TC210 der Firma Covestro AG.

Am IKV wurden grundlegende Untersuchungen mit den gewählten Materialien und deren Verbund durchgeführt. Anhand von Zugstäben mit Stoßverbindung wurden mechanische Zugfestigkeiten zwischen den Materialpaarungen untersucht [HSJ22]. Zur besseren Einordnung der Ergebnisse wurden für alle ausgewählten Kunststoffe zweifach angespritzte Zugstäbe mit Bindenahrt aus einem Materialtyp als Referenz betrachtet. Die Ergebnisse zeigen generell eine verbesserte Zugfestigkeit von PMMA im Vergleich zu optischen PC. Durch die niedrigere Schmelztemperatur des PMMA lässt sich die höhere Zugfestigkeit von der PMMA Zugstäben erklären. Die Verbundfestigkeit der Gehäusematerialien nimmt mit Zunahme des thermisch leitfähigen Additivs ab.

Für die Untersuchung der Mediendichtheit wurde ein Prüfkörper in Anlehnung an DIN EN ISO 53380-3 entwickelt und Werkzeugeinsätze durch die Fa. Krallmann GmbH gefertigt. Mit diesen wurden am IKV Probekörper zur Untersuchung der Wasserdurchlässigkeit in der Verbundebene hergestellt und mittels einer vorhandenen Water-Vapor-Transmission-Rate-Kammer (WTVR) untersucht. Bei den Proben mit TC110 im Verbund mit den optischen Materialien hat die Materialverbindung im Mittel eine Mediendichtheit von 1,44 g/m²/Tag. Allerdings zeigt sich ein besserer WVTR-Wert bei 2K-Proben mit PC 2405 als die WVTR-Werte von den einzelnen Materialien. Dies zeigt, dass die Stoßverbindung keinen Einfluss auf die Mediendichtheit hat.

Zur Konzeptentwicklung für die Umsetzung des Technologieträgers wurden Spritzgießsimulationen mit den definierten Materialien an verschiedenen Konzeptgeometrien durchgeführt. Durch die Simulationen wurde das Prozessverständnis erhöht. Dadurch konnten die Werkzeuginnendrücke während des Prozesses abgeschätzt und damit die Werkzeugkonstruktion und Auslegung der Kontaktierung der elektronischen Komponenten mittels IMKS unterstützt werden. Es wurden verschiedene Angusspositionen untersucht und hierbei zeigte sich, dass ein Anguss fern des Linsenbereichs den geringsten Einfluss auf die Eigenspannungen hat. Bei der Verzugsuntersuchung zeigt sich bei einem vom optischen Bereich entfernter Anguss ein hoher Verzug im Bereich der Optik. Damit diese verzugsarm abgeformt wird, wird in Absprache mit den Projektpartnern verzugsarme Angussposition gewählt.

Die im Projekt entwickelte und konstruierte Kunststoffoptik wurde an IKV weitergehend auf den Zusammenhang von Abformgenauigkeit und Prozessparameter untersucht. Dabei zeigt sich, dass bei den Bauteilen aus PC im direkten Linsenbereich eine um 12 % geringere Abweichung zur Sollgeometrie vorliegt als bei PMMA, über das gesamte Bauteil aber eine um 12 % geringer Abweichung bei PMMA vorliegt.

Die grundlegenden Untersuchungen an IMKS-Probekörpern lassen sich in vier Bereiche unterteilen. Zunächst wurden Untersuchungen hinsichtlich möglicher Kunststoff/Lot-Materialpaarungen durchgeführt. Dabei wurden Probekörper mit den drei zuvor ausgewählten Kunststoffen für das Gehäuse im Zusammenhang mit drei Standartloten aus dem E/E-Bereich (Sn96Ag+, Sn100Ni+ (beide: Felder GmbH Lottechnik, Oberhausen) und Bi58Sn42 (Tamura Elsold GmbH, Ilsenburg) betrachtet. Im Rahmen der anschließend durchgeführten elektrischen und mechanischen Belastungstests zeigte sich das Lot Sn100Ni+ als vielversprechendstes Lot, sodass in den weiteren Untersuchungen und für die Fertigung des Demonstrators dieses Material im Zusammenhang mit den drei Kunststoffen verwendet wurde.

Anschließend erfolgten Untersuchungen hinsichtlich möglicher Fließweglängen des metallischen Lots, in Abhängigkeit von prozess- und materialbedingten Parametern. Weiterhin erfolgte ein Vergleich der Leitfähigkeit zwischen Leiterbahnbeginn und -ende sowie eine Analyse der Bauteilerwärmung. Zur Realisierung langer Leiterbahnen sollte im Spritzgießprozess ein niedriger Nachdruck und niedrige thermische Bedingungen eingestellt werden. Druckgießseitig zeigte sich, dass eine hohe

Schmelztemperatur des Lots eine lange Leiterbahn zur Folge hat. Hinsichtlich der Bauteilerwärmung zeigte sich, dass wärmeleitfähige Trägermaterialien vorteilhaftere Bauteileigenschaften im IMKS hervorbringen können als nicht wärmeleitfähige Trägermaterialien. Zudem zeigte sich eine grundlegende Eignung der IMKS-Bauteile entsprechend der VW 80000 Richtlinie.

Aufbauend auf den Ergebnissen wurden die Hafteigenschaften zwischen Kunststoff und Leiterbahn untersucht. Ziel war die Charakterisierung der vorliegenden Haftungsmechanismen des Lots im Zusammenhang mit den drei Polycarbonate. Der vorliegende Haftmechanismus bei Makrolon 2405 ist ein Kraftschluss, bei Makrolon TC110 eine Kombination aus mechanischer Adhäsion und einem Kraftschluss, und bei Makrolon TC210 mechanische Adhäsion. Ferner kann bei Nutzung der wärmeleitfähigen Kunststoffe eine höhere Verbundfestigkeit erreicht werden, sodass eine bis zu 146-prozentige Steigerung der benötigten Schälkraft gegenüber Makrolon 2405 notwendig ist, um den Materialverbund zu trennen.

Abschließend wurden Untersuchungen zur Anbindung der el. Einlegern vorgenommen, da auch beim Demonstrator Bauteile im IMKS kontaktiert werden. Dabei wurde die mögliche Reduzierung der Wärmeentwicklung durch thermisch leitfähige Kunststoffe IMKS-Verbund untersucht. Bei den Stromtragfähigkeitsuntersuchungen zeigen die IMKS-Prozessparameter keinen Einfluss auf die Erwärmung. Es wird jedoch deutlich, dass Makrolon TC110 und Makrolon TC210 geringer erwärmt werden als Makrolon 2405 und für Anwendungen mit vergleichsweise hoher Strombelastung besser geeignet sind. Ferner zeigt sich, dass durch die Kühlwirkung von Makrolon TC110 und Makrolon TC210 eine Reduzierung der Hot Spots möglich ist.

Im Rahmen der Demonstratorherstellung und der anschließenden Bauteilanalyse erfolgte die Demonstratorherstellung in vier Fertigungsschritten. Im ersten Schritt erfolgte die Herstellung des Vorspritzlings mit Kontaktstiften, in Schritt 2 wurden Leiterbahnen mittels IMKS hinzugefügt. In Schritt 3 wurde eine Ummantelung gespritzt, zudem erfolgte die Positionierung der Optik. Abschließend wurde ein Rahmen; welcher Ummantelung und Optik verbindet; hinzugefügt. Die anschließenden Bauteilanalysen erfolgten am IKV (Bestimmung der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit und Verzugsanalysen) und bei Mentor. Die Bauteile zeigten durchweg sehr gute Leitfähigkeitswerte auf, sodass von wenig Leiterbahndefekten (wie Lufteinschlüsse) ausgegangen werden kann. Ferner zeigten die Bauteile von Schritt 2 und 3 lediglich sehr geringen Verzug auf, wobei der Verzug von Makrolon 2405 minimal höher war als von den thermisch leitfähigen Materialien.

In dem Verbundvorhaben konnten erfolgreich Grundlagenuntersuchungen zu den Verbundmaterialien und Prozessen durchgeführt werden. Die Ergebnisse zeigen, dass die festgelegten Anforderungen dabei erfüllt wurden und ein funktionierender Demonstrator umgesetzt werden konnte. Des Weiteren konnte durch den Projektpartner eine Fertigungszelle skizziert werden, die die im Projekt hergestellten Werkzeuge und Ergebnisse aufgreift und eine Umsetzung aufzeigt.

Teil II: Eingehende Darstellung

In Zusammenarbeit mit dem Projektkonsortium wurde zur Umsetzung einer Integrierte Spritzgießtechnologie für LED-Lichtquellen mit Vorsatzoptik ein Demonstratorbauteil ausgewählt, bei dem es sich um eine Kennzeichenleuchte aus dem Automotivebereich handelt. Bisher werden die Scheibe und das Gehäuse durch Ultraschallschweißen gefügt und die bestückte Platine wird mit dem Gehäuse verrastet. Die Stecker werden in der Produktion manuell montiert. Ziel ist es; eine automatisierte Kontaktierung mittels IMKS-Verfahren und eine Prozessvereinfachung durch mediendichtetes Überspritzen der Optik zu erreichen. Dabei wird eine IP 68-Klasse in einem Temperaturbereich -40 °C bis +125 °C gefordert sowie Brandprüfungen nach der Richtlinie TL1010. Des Weiteren ist eine Lagetoleranz der LED-Position vom $\pm 0,1$ mm zur Optik zulässig. Dadurch soll unter anderem die korrekte und vollständige Ausleuchtung des Kennzeichens gewährleistet werden.

Im Projektkonsortium wurde eine Auswahl an möglichen Materialien für die Optik und für das Gehäuse getroffen. Dabei wurden als mögliche optische Materialien ein Polycarbonat: PC, Makrolon LED2245 der Firma Covestro AG, Leverkusen, und ein Polymethylmethacrylat: PMMA, Plexiglas 7N der Firma Röhm GmbH, Darmstadt, definiert. Weiterhin wurden als mögliche Gehäusematerialien verschiedene Polycarbonate ausgewählt. Als mögliche Kunststoffe für das Gehäuse des LED-Beleuchtungssystems wurden neben dem Standardgehäusematerial, Makrolon 2405, auch thermisch die leitfähigen Polycarbonate, Makrolon TC110 und Makrolon TC210 der Firma Covestro AG, Leverkusen, betrachtet.

Material- und Verbunduntersuchungen

Am Institut für Kunststoffverarbeitung wurden mit der Materialauswahl des Konsortiums grundlegende Untersuchungen zur Verbundfestigkeit durchgeführt. Dazu wurden Campus-Zugstäbe nach DIN EN ISO 527 A1 gefertigt und untersucht [NN19]. Bei der Herstellung der Zugstäbe wurde in Anlehnung an die spätere Fertigung des Technologenträgers eine Optik- und eine Gehäusekomponente der Zugstäbe mit Bindenahrt gefertigt. Dabei wurde zunächst die optische Komponente spritzgegossen und anschließend die Gehäusekomponente angespritzt. Vor dem Anspritzen mit der zweiten Komponente wurden die halben Zugstäbe auf Raumtemperatur abgekühlt. Zur besseren Einordnung der Ergebnisse durch Zugversuche wurden für alle ausgewählten Kunststoffe zweifach angespritzte Zugstäbe aus einem Material als Referenz betrachtet. Die Verbindungsfläche zwischen den beiden Komponenten beträgt im Stoß 40 mm^2 und befindet sich in der Mitte des Zugstabs. Bei den Versuchen wurden die Spritzgießparameter der zweiten Komponenten (optisches Material) aus Tabelle 1 variiert. Als Parameter mit einem besonders großen Einfluss auf die Verbundfestigkeit wurden der Nachdruck, Einspritzgeschwindigkeit und die Schmelztemperatur identifiziert. Zur Untersuchung der Zugfestigkeit wurden nach DIN EN ISO 527-1 die Dehnrate mit 1 %/min eingestellt und die Versuche durchgeführt.

Optische Materialien

Plexiglas 7N	-	0	+
Schmelztemperatur [°C]	220	240	260
Einspritzgeschwindigkeit [mm/s]	40	120	200
Nachdruck [bar]	300	400	500
Makrolon LED2245	-	0	+
Schmelztemperatur [°C]	280	300	320
Einspritzgeschwindigkeit [mm/s]	40	120	200
Nachdruck [bar]	300	400	500

Gehäusmaterialien

Makrolon 2405	-	0	+
Schmelzetemperatur [°C]	280	300	320
Einspritzgeschwindigkeit [mm/s]	40	120	200
Nachdruck [bar]	300	400	500
Makrolon TC110	-	0	+
Schmelzetemperatur [°C]	290	305	320
Einspritzgeschwindigkeit [mm/s]	40	120	200
Nachdruck [bar]	300	400	500
Makrolon TC210	-	0	+
Schmelzetemperatur [°C]	290	305	320
Einspritzgeschwindigkeit [mm/s]	40	120	200
Nachdruck [bar]	300	400	500

Tabelle 1: Prozessparameter der zweiten Komponenten zur Herstellung von 2K-Zugstäbe

Die Ergebnisse in Abbildung 1 zeigen generell eine verbesserte Zugfestigkeit von PMMA im Vergleich zu PC als optisches Material. Die Verbundfestigkeit der Gehäusmaterialien nimmt mit Zunahme des thermisch leitfähigen Anteils ab. Dies wird sowohl im Zusammenhang mit PC als auch mit PMMA als optische Komponente ersichtlich. Im Vergleich zu 2K-Zugstäben aus einem Gehäusmaterial ist die Verbundfestigkeit höher als bei Zugstäben aus optischem und Gehäusmaterial.

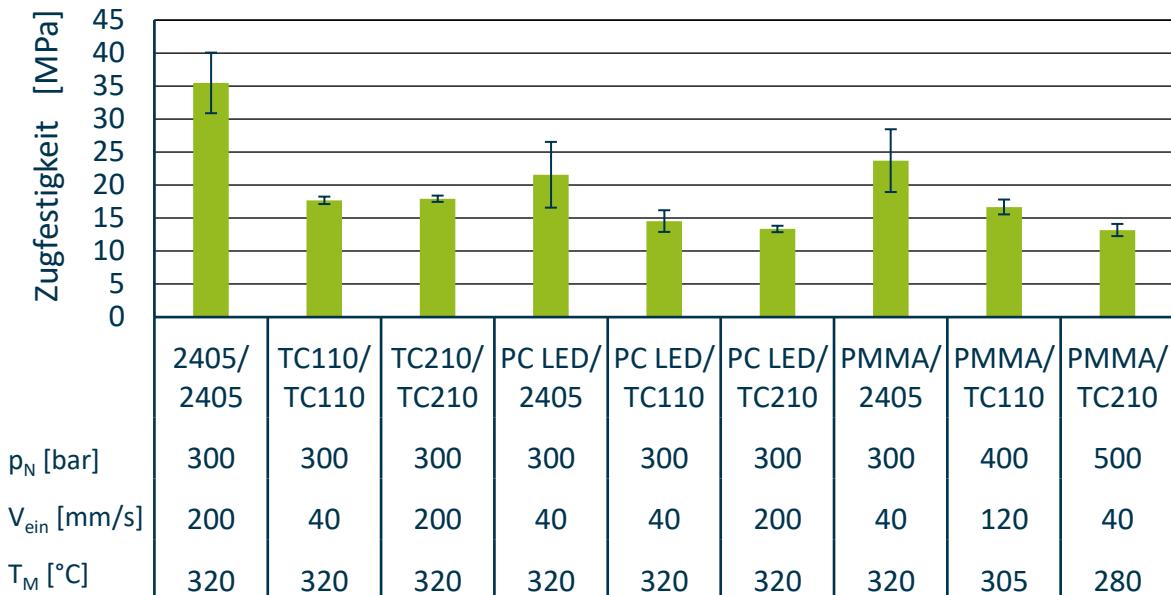


Abbildung 1: maximale Zugfestigkeiten zwischen den optischen Materialien in Verbindung mit Gehäusmaterialien und den entsprechenden Versuchspараметer

Zur Untersuchung der Mediendichtheit wurden durch die Krallmann GmbH Werkzeugeinsätze für vereinfachte Probekörpergeometrien gefertigt. Mit diesen wurden am IKV Probekörper zur Untersuchung der Wasserdurchlässigkeit in der Verbundebene an der Spritzgießmaschine ENGEL e-motion 440/160 der Firma ENGEL Austria GmbH, Schwerberg, Österreich, hergestellt. Dabei werden die zuvor definierten Materialien und Prozessparameter nach Tabelle 1 variiert. Die hergestellten runden Probekörper haben einen Gesamtdurchmesser von 90 mm und eine Fläche von

63,62 cm² und Dicke von 1,5 mm (Abbildung 2). Dabei wird zuerst ein äußerer Ring mit einer Fläche von 55,71 cm² (~87,5 %) im Spritzgießverfahren hergestellt. Anschließend wird der Ring mittig mit einem zweiten Kunststoff angespritzt. Dieser hat einen Durchmesser von 31,73 mm und eine Fläche von 7,91 cm² (~12,5 %). Die Fläche der Stoßverbindung beträgt dabei 150 mm².

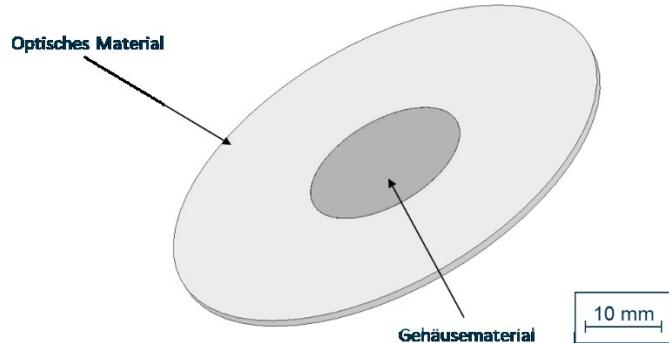


Abbildung 2: Probekörper zur Mediendichtheitsmessung

Die Probekörper werden in einer Water-Vapor-Transmission-Rate-Kammer (WVTR) untersucht (Abbildung 3). Dabei wird der Probekörper in der Messkammer mediendicht eingespannt, sodass die Kammer durch die Probe in einen unteren und einen oberen Bereich unterteilt wird. Unterhalb der Probekörper-Hälfte wird ein mit Wasser vollgesogener Schwamm in der Kammer platziert. Beide Bereiche der Kammer werden mit einem Trägergas gespült und anschließend wird die Menge der Wassermoleküle gemessen, die durch den Probekörper diffundieren und in der oberen Kammer vom Trägergas mitgenommen werden.

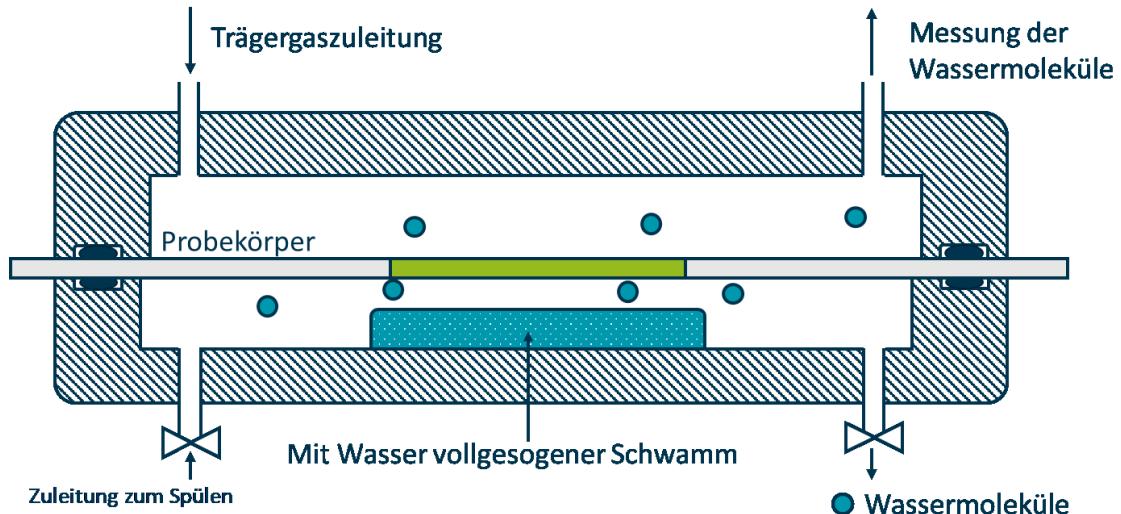


Abbildung 3: Prüfung der Durchlässigkeit mittels WVTR-Messung

Der WVTR Messung nähert sich dann einem konstanten Wert an, der als WVTR-Wert zur Auswertung genutzt wird. Zuerst wurden die Materialien einzeln untersucht. Daraus sollen sich dann Rückschlüsse auf die Kombination der Materialien, bzw. der Einfluss der Stoßverbindung ableiten lassen. Die Ergebnisse der Messungen sind in Abbildung 4 zu erkennen. Dabei zeigt das Material PC LED2245 einen signifikant höheren WVTR-Wert. Die Prüfkörper aus zwei Materialien liegen in der gleichen Größenordnung, wie auch die Probekörper aus einem Material. Bei den Messungen wurde jeweils ein Probekörper untersucht, der mit den Prozessparametern der maximalen und minimalen Zugkraft, die in den vorherigen Untersuchungen mittels 2K-Zugstäbe ermittelt wurden, hergestellt worden ist.

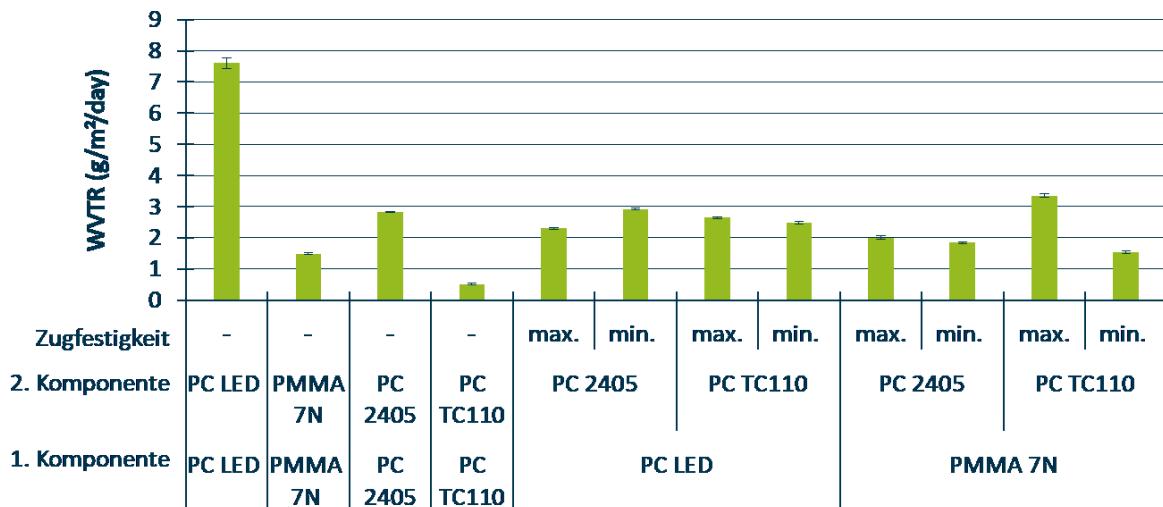


Abbildung 4: Water-Vapor-Transmission-Rate Messungen der einzelnen Materialien und Materialkombinationen an den Versuchspunkten mit der niedrigsten und höchsten gemessenen Zugfestigkeit

Zum besseren Vergleich des Einflusses der Stoßverbindung wurden in Abbildung 5 der Einfluss der Stoßverbindung berechnet. Dabei wurden die WVTR-Werte in Abhängigkeit der Flächenanteile der Materialien bestimmt und von den Messwerten der 2K-Probekörper abgezogen. Bei den Proben mit TC110 zeigt sich ein Einfluss der Stoßverbindung auf die Mediendichtheit im Mittel von 1,44 g/m²/Tag. Allerdings zeigt sich ein besserer WVTR-Wert bei den 2K-Proben mit PC 2405 als die WVTR-Werte der reinen Materialien. Dies lässt vermuten, dass die Stoßverbindung keinen Einfluss auf die Mediendichtheit hat, aufgrund der geringen Anzahl an Messungen muss dies durch weitere Messungen bestätigt werden.

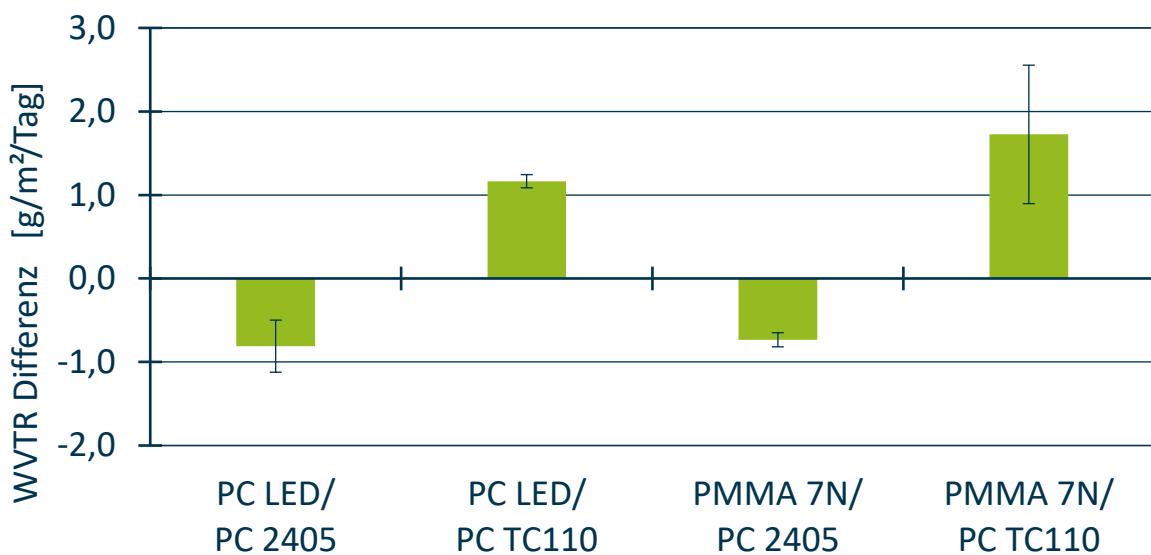


Abbildung 5: WVTR Differenz der 2K-Probekörper zu den reinen Materialien in Abhängigkeit der Fläche

Unterstützende Spritzgießsimulationen

Des Weiteren wurden simulative Untersuchungen der einzelnen Bauteilkomponenten des Demonstrators zur Ermittlung des Angusspunktes und zur Unterstützung der Werkzeugkonstruktion bei dem Projektpartner Krallmann GmbH mittels Moldex3D (CoreTech System Co., Ltd., Zhubei City, Taiwan) durchgeführt. Im Zuge der Untersuchung der Vorsatzoptik wurde die nötige Füllzeit mit den

in Abbildung 6 gezeigten Angusspositionen untersucht, wobei es sich bei Position 1 um einen Standard Stangenanguss und in den weiteren Simulationen (Pos. 2 – Pos. 4) um einen angepassten Angussverteiler handelt. Als Prozessparameter wurden die Daten aus dem Datenblatt des verwendeten Materials, Makrolon LED2245 (Covestro AG, Leverkusen) angewandt.

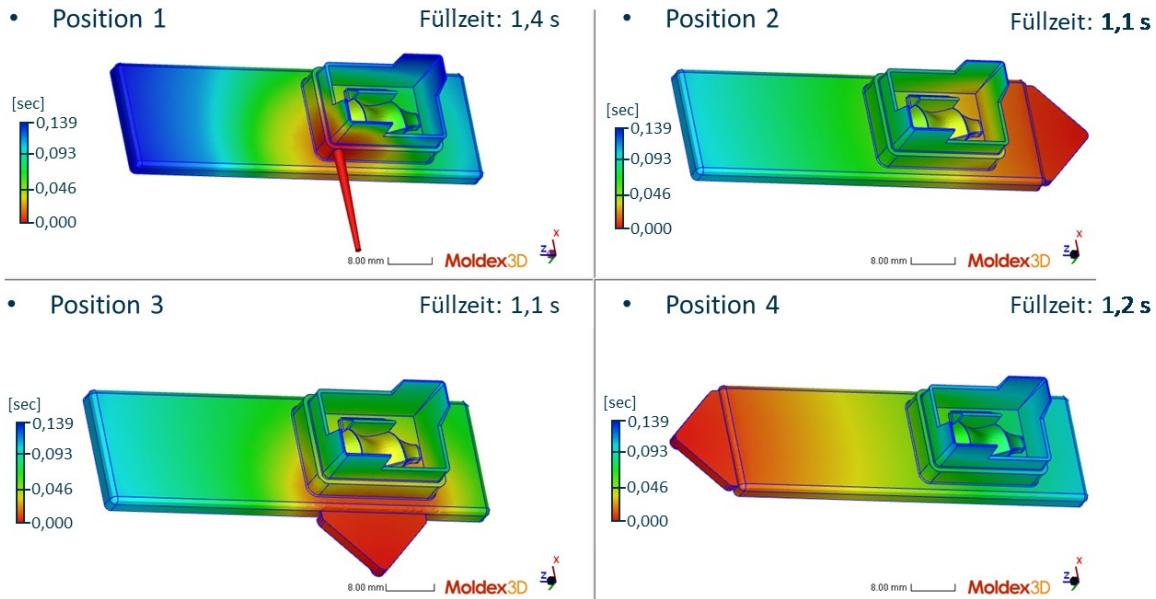


Abbildung 6: Angussstudie zum Füllverhalten der Vorsatzoptik

Dabei wird deutlich, dass durch den geometrisch angepassten Angussverteiler die Gesamtfüllzeit um ca. 20 % reduziert werden kann. Bei Betrachtung der Vorsatzoptik sind auch die optischen Eigenschaften zu berücksichtigen. So können die thermisch und mechanisch eingebrachten Spannungen zu Doppelbrechungseffekten und somit zu ungewünschter Lichtverteilung führen. Die Gesamtdoppelbrechung ist auch von der Angussgeometrie und Position abhängig, wie in Abbildung 7 zu erkennen ist:

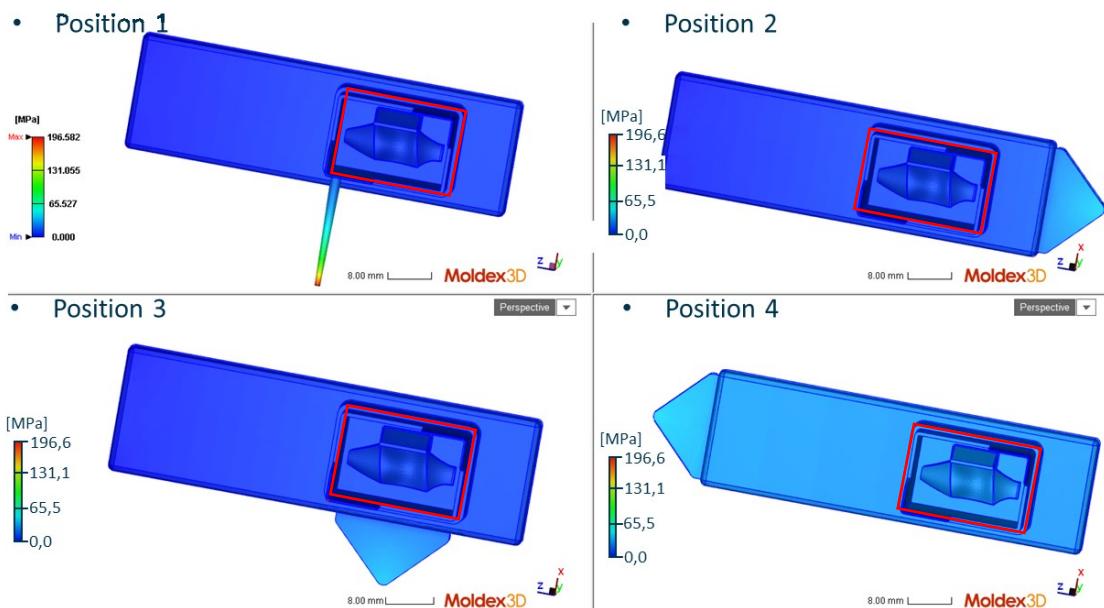


Abbildung 7: Gesamtdoppelbrechung in der Vorsatzoptik in Abhängigkeit des Angusses

Zu erkennen ist die erhöhte Doppelbrechung im optisch relevanten Bereich (rot umrandet) in allen vier Simulationen aufgrund der geometrischen Komplexität. Dabei tritt beim Stangenanguss eine stark erhöhte lokale Doppelbrechung auf und in den Simulationen mit einem Anguss nahe der relevanten Optik (Pos. 2 und Pos. 4) zeigt sich eine erhöhte Doppelbrechung im gesamten relevanten Bereich. Die Ergebnisse zur Vorsatzoptik deuten darauf hin, dass ein angepasster Angussverteiler zur besseren Füllung und optischen Leistungsfähigkeit des Bauteils genutzt werden sollte, wie er in Position 3 und 4 verwendet wird.

Das Bauteil zur Aufnahme der Platine und der Leiterbahnen weisen keine auffälligen Stellen für mögliche Lufteinschlüsse oder Bindenähte auf (Abbildung 8). So liegen die Lufteinschlüsse am Ende der Fließwege und sollten durch die Trennebene im Werkzeug austreten können. Die Bindenähte befinden sich hinter den Domen und sind nicht zu vermeiden. Bei dem Gehäuse, das die Platinen-Aufnahme mit LED und im IMKS-Verfahren gefertigten Leiterbahnen umfasst und die Vorsatzoptik aufnimmt, werden Lufteinschlüsse und Bindenähte im Bereich der zu platzierenden Kontaktstifte erkennbar. Es ist nach der Fertigung des Technologieträgers zu prüfen, ob an diesen möglichen Fehlstellen eine Medienundichtigkeit entsteht und somit eine Verwendbarkeit der Leuchte im Automotive- oder Außenbereich nicht mehr gewährt wäre.

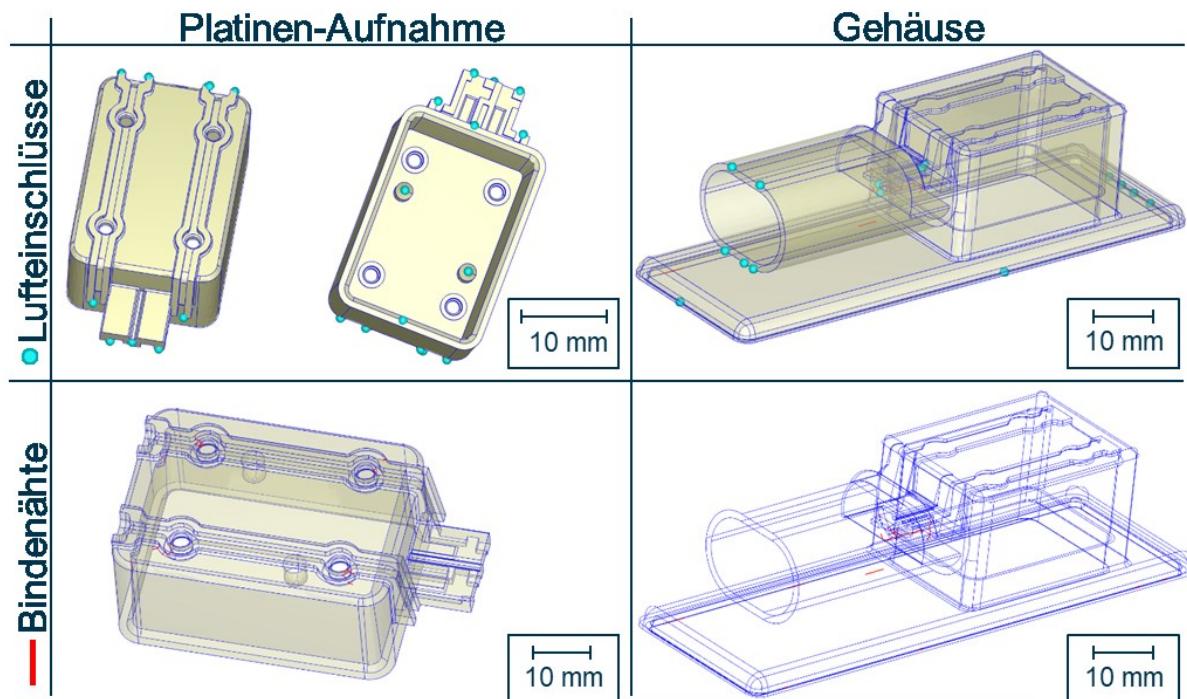


Abbildung 8: Fehlstellen in der Platinen-Aufnahme und des Gehäuses

Wird die gesamte Deformation des Gehäuses, die sich aus der Schwindung und dem Verzug zusammensetzt, betrachtet, wird erkennbar, dass die äußeren Bereiche der Optikaufnahme deformiert sind. Ebenso ist der Bereich der Kontaktstifte und somit des elektrischen Anschlusses deutlich von einer Deformation aufgrund erhöhter Schwindung betroffen. Die Bereiche sind in Abbildung 9 durch rote Kreise markiert.

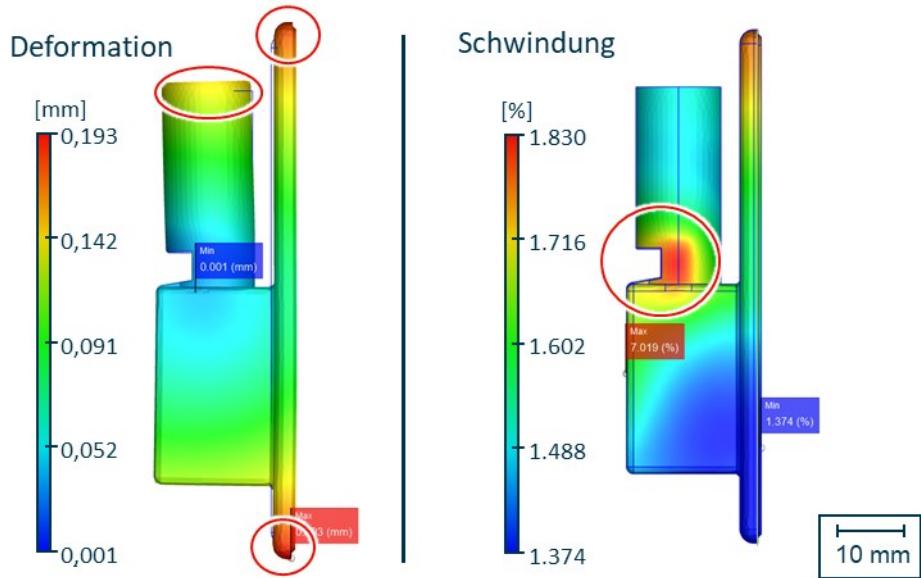


Abbildung 9: Deformation und Schwindung des Gehäuses

Die Simulationsergebnisse zeigten, dass der gewählte Angussverteiler aus Position 3 eine gute Füllung der Vorsatzoptik gewährleistet und bei einer Positionierung am Ende der Optik die Doppelbrechung reduziert werden kann. Fehlstellen können durch die möglichen Lufteinschlüsse im Bereich der Kontaktstifte auftreten.

IMKS-Verfahren

Im Rahmen des Projekts wurden mit dem IMKS-Verfahren Untersuchungen mit vier verschiedenen Schwerpunkten durchgeführt. Zunächst wurden Untersuchungen hinsichtlich möglicher Kunststoff/Lot-Materialpaarungen durchgeführt. Zur Auswahl geeigneter Materialkombinationen für das IMKS-Verfahren erfolgte zunächst die Auswahl einer geeigneten Probekörpergeometrie. Dabei wurde ein quadratischer Kunststoffträger gewählt (Abbildung 10). Dieser beinhaltete eine L-förmige Nut, in welche im nachfolgenden Schritt das metallische Lot zur Herstellung der Leiterbahnnut eingespritzt wurde. Für den Kunststoffträger wurden neben dem Standardgehäusematerial Makrolon 2405, auch die zwei thermisch leitfähigen Kunststoffe, Makrolon TC110 und Makrolon TC210, verwendet. Als Leiterbahnmaterialien wurden die drei Lote Sn96Ag+, Sn100Ni+ (beide: Felder GmbH Lottechnik, Oberhausen) und Bi58Sn42 (Tamura Elsold GmbH, Ilsenburg) betrachtet. Ferner wurde eine Variation des Nachdrucks bei der Kunststoffträgerherstellung vorgenommen, um zu prüfen, ob die spritzgießseitigen Prozessparameter einen Einfluss auf die resultierenden Verbundeigenschaften haben. Die Bewertung der Bauteile wurde anhand der Bestimmung der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit sowie anhand von Zugprüfungen durchgeführt.

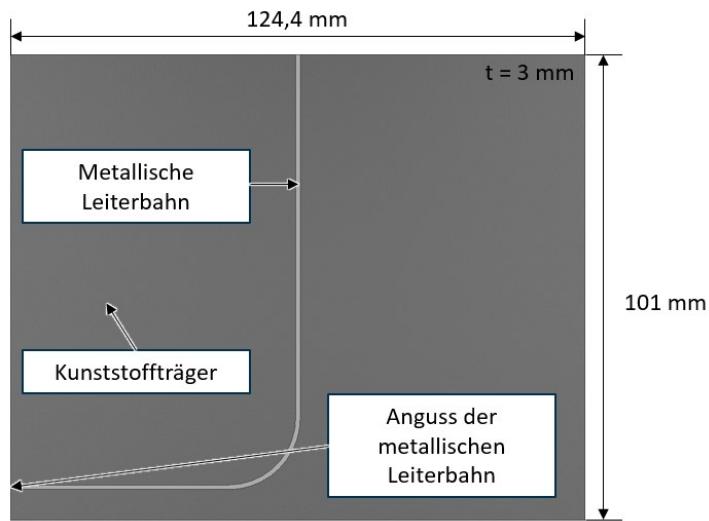


Abbildung 10: Probekörper zur Untersuchungen hinsichtlich möglicher Kunststoff/Lot Materialpaarungen

Im Rahmen der elektrischen Belastungstests wurde die spezifische elektrische Leitfähigkeit sowie die Bauteilerwärmung unter konstanter Strombelastung der jeweiligen Materialkombination ermittelt. Zur Messung der elektrischen Leitfähigkeit wurde der jeweilige Probekörper zur Fixierung in eine Aufnahme eingespannt und ein Netzteil des Typs Hioki 3541 Resistance Hi-Tester (ASM GmbH Automation, Moerssinning) durch zwei Aufsatzelektroden am Anfang und am Ende der Leiterbahn angeschlossen. Dabei zeigten sich die Materialkombinationen bestehend aus dem Leiterbahnmaterial Sn100Ni+ im Zusammenhang mit den beiden thermisch leitfähigen Kunststoffen als die am vielversprechendsten Materialkombinationen (Abbildung 11), da für die vorliegende Anwendung Leitfähigkeiten der Leiterbahnen im Bereich von $4 - 5 \cdot 10^6 \text{ S/m}$ notwendig sind.

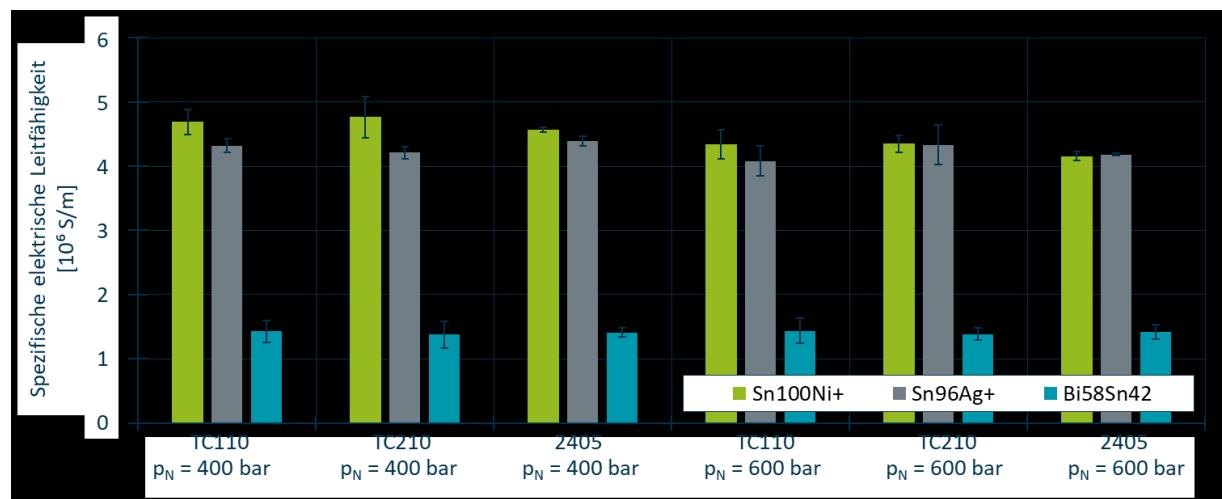


Abbildung 11: Spezifische elektrische Leitfähigkeiten aller Materialkombinationen

Zur anschließenden Messung der Bauteilerwärmung wurde der jeweilige Probekörper eingespannt und ein Netzteil des Typs HCS-3600 (Manson Engineering Industrial Ltd., Hongkong, China) durch zwei Aufsatzelektroden am Anfang und am Ende der Leiterbahn angeschlossen. Die Temperatur wurde mit Hilfe einer Infrarotkamera der Flir Systems Inc., Wilsonville, USA, gemessen. Bei der Messung der Bauteilerwärmung unter konstanter Strombelastung wurden die Bauteile mit einem Strom von 10 A und anschließend mit 20 A belastet. Mit Bi58Sn42, waren im Vergleich zu den anderen beiden Loten lediglich Messungen mit 10 A möglich, da die Leiterbahnen bei einer höheren Strombelastung aufgeschmolzen sind. Dies ist durch den geringeren Schmelzpunkt von Bi58Sn42 (139 °C) im Vergleich

zu den anderen Loten (Sn100Ni+: 227 °C und Sn96Ag+: 217 °C) zu erklären. Ergebnis der Untersuchungen war, dass die Kunststoffträger aus leitfähigen Kunststoffen die Wärme besser abführen können. Beispielsweise liegt bei Sn100Ni+, einem konstanten Nachdruck von 400 bar und einer Strombelastung von 20 A im Zusammenhang mit Makrolon TC110 die maximale Temperatur bei ca. 100 °C, im Zusammenhang mit Makrolon TC210 bei ca. 97 °C, unter Verwendung von Makrolon 2405 jedoch bei einem vergleichsweise hohen Wert von 117 °C.

Im Rahmen der Untersuchungen der maximalen Zugfestigkeit des Materialverbunds, jeweils bestehend aus Kunststoffträger und metallischer Leiterbahn, wurden die Proben zunächst präpariert, indem der Abschnitt von Anspritzpunkt der Leiterbahn bis zur Kurve aus dem Kunststoffträger herausgetrennt worden ist. Zur Messung der Verbundfestigkeit zwischen metallischer Leiterbahn und Kunststoffträger wurden Zugprüfungen durch eine Zugprüfmaschine des Modells Z150 der ZwickRoell AG, Ulm, durchgeführt. Dabei wurde der Kunststoffträger durch herkömmliche Spannpratzen eingespannt, die metallische Leiterbahn wurde durch spezielle Folienspannpratzen fixiert. Anschließend wurde die Leiterbahn mit einer definierten Geschwindigkeit von 2 mm/min nach oben aus dem Kunststoffträger herausgeschält. Aufgrund der unterschiedlichen Querschnitte konnten aus den Messungen hinsichtlich der Zugfestigkeit lediglich die maximale Auszugskraft ermittelt werden, jedoch keine Parameter wie beispielsweise der E-Modul oder die plastische Dehnung.

Auch durch die Zugversuche ließ sich der Materialverbund im Zusammenhang mit Bi58Sn42 als das schlechteste Alternative identifizieren. Lediglich im Zusammenhang mit TC110 und einem Nachdruck von 400 bar war überhaupt eine Messung der Auszugskraft der Leiterbahn aus dem Kunststoffträger möglich, da bei den anderen Proben, bereits bei der Probenpräparation die Leiterbahn herausgebrochen ist. Bei der Messung der Zugfestigkeiten zeigten sich die Lote Sn100Ni+ und Sn96Ag+ im Zusammenhang mit TC110 als vielversprechendste Materialkombinationen. Im Rahmen der Untersuchungen zeigte sich das Lot Bi58Sn42 als für den Anwendungsfall ungeeignet.

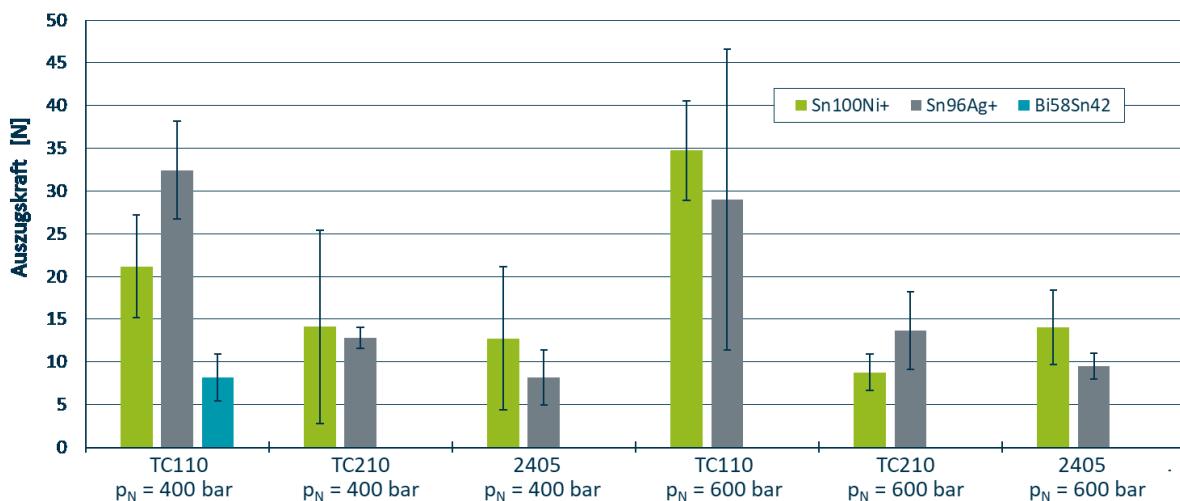


Abbildung 12: Notwendige Auszugskräfte für alle Materialverbunde

Entsprechend der durchgeführten elektrischen und mechanischen Belastungstests zeigte sich das Lot Sn100Ni+ als vielversprechendstes Lot, sodass in den weiteren Untersuchungen und für die Fertigung des Demonstrators dieses Material im Zusammenhang mit den drei Kunststoffen verwendet wurde.

Anschließend erfolgten Untersuchungen hinsichtlich möglicher Fließweglängen des metallischen Lots, in Abhängigkeit von prozess- und materialbedingten Parametern. Weiterhin erfolgte ein Vergleich der Leitfähigkeit zwischen Leiterbahnbeginn und -ende sowie eine Analyse der Bauteilerwärmung. Zudem wurden die Bauteile gemäß den Tests der VW 80000 geprüft, um eine grundlegende Eignung für Automobilanwendungen nachzuweisen.

Als Probekörpergeometrie wurde ein Kunststoffträger mit den Maßen von ca. 124 mm x 101 mm x 3 mm gewählt, welcher eine fließspiralförmige Nut für die Leiterbahn beinhaltet (Abbildung 13). Auf Basis von vorangegangenen Arbeiten, wurde ein Leiterbahnquerschnitt von 1,5 mm x 1,5 mm vorgesehen [HS20]. Die Leiterbahn hat eine Gesamtlänge von 800 mm. Es wurden IMKS-Probekörper unter Variation von spritzgieß- und druckgießseitigen Prozessparametern hergestellt. Diese wurden auf einer Spritzgießmaschine Demag Ergotech 80/420-310 der Firma Sumitomo (SHI) Demag Plastics Machinery GmbH, Schwaig bei Nürnberg. Dabei wurden spritzgießseitig die Temperatur der Kunststoffsenschmelze (T_{KS}), die Werkzeugtemperatur (T_w), der Nachdruck (p_N) und die Einspritzgeschwindigkeit (v_{Ein}) variiert. Druckgießseitig wurde die Temperatur der metallischen Schmelze (T_{DS}) und die Kolbengeschwindigkeit (v_K), wie in Tabelle 2 aufgelistet, verändert.

Spritzgießparameter	-	+
Kunststoffsenschmelztemperatur (T_{KS}) [C]	280/300	300/320
die Werkzeugtemperatur (T_w) [°C]	60	80
Nachdruck (p_N) [bar]	400	700
Einspritzgeschwindigkeit (v_{Ein}) [cm³/s]	40	50
Druckgießparameter	-	+
Metallschmelztemperatur (T_{DS}) [°C]	290	330
Kolbengeschwindigkeit (v_K)	30	40

Tabelle 2: Untersuchte Prozessparametervariationen

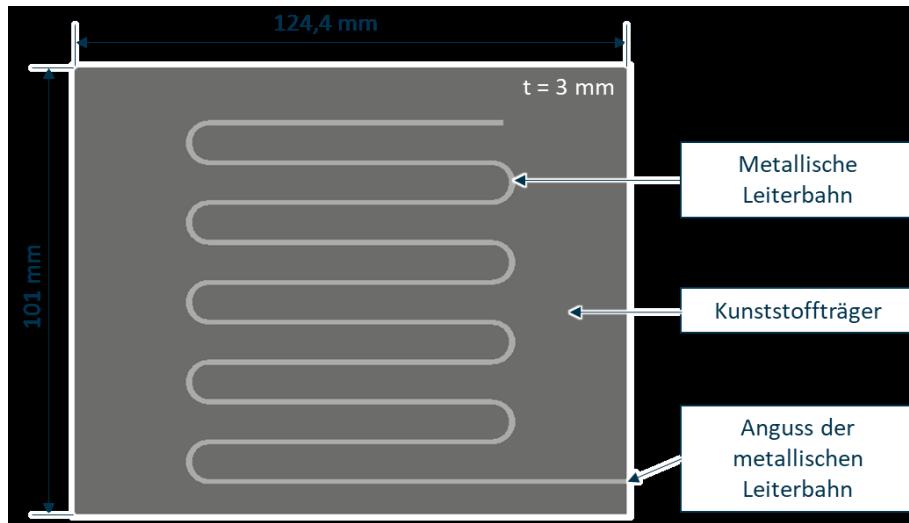


Abbildung 13: Probekörper zur Untersuchungen hinsichtlich möglicher Fließweglängen des metallischen Lots

Zunächst erfolgte eine Analyse der realisierbaren Leiterbahnlängen, um material- und prozessbedingte Verarbeitungsrichtlinien zu definieren. Die Messung der tatsächlichen Leiterbahnlängen erfolgte mittels einer Messschablone. Es zeigte sich im Zusammenhang mit allen drei Kunststoffen, dass wenig Nachdruck, eine geringere Werkzeugtemperatur und eine geringere Kunststoffsenschmelztemperatur zu längeren realisierbaren Leiterbahnlängen führt. Somit sollte beim Spritzgießprozess ein niedriger Nachdruck und niedrige thermische Bedingungen (niedrige Schmelztemperaturen und niedrige Werkzeugtemperaturen) eingestellt werden, um Verzug entlang der Leiterbahnnut zu vermeiden und damit eine Weiterverarbeitung im Druckgießverfahren zu ermöglichen. Druckgießseitig zeigte sich, dass, wie erwartet, eine hohe Schmelztemperatur des metallischen Lots eine lange Leiterbahn zur Folge hat. Zudem ist eine Abnahme der Leiterbahnlänge über die zunehmende Wärmeleitfähigkeit der drei Kunststoffe zu erkennen. Dennoch können mit Makrolon TC110 und Makrolon TC210 lange

Leiterbahnlängen von bis zu 800 mm realisiert werden. Beide Materialien eignen sich demnach unter diesen Aspekten für das IMKS.

Untersuchung der elektrischen Leitfähigkeit

Zur Charakterisierung der Leitfähigkeit wurde anschließend ein Vergleich der Leitfähigkeit zwischen Leiterbahnbeginn und -ende vorgenommen. Zur Messung der elektrischen Leitfähigkeit wurde der jeweilige Probekörper zur Fixierung in eine Aufnahme eingespannt und ein Netzteil des Typs Hioki 3541 Resistance Hi-Tester (ASM GmbH Automation, Moorsinning) durch zwei Aufsatzelektroden am Anfang und am Ende der Leiterbahn angeschlossen. Anschließend werden jeweils die Probekörper eines Kunststoffs betrachtet und bewertet. In Abbildung 14 ist der Vergleich der Leitfähigkeit zwischen Leiterbahnbeginn und -ende für jeden druckgießseitigen Versuchspunkt für Makrolon TC210 dargestellt. Die Leitfähigkeit bei Versuchspunkten mit hohen Schmelztemperaturen des metallischen Lots ist am Leiterbahnende besser als am Leiterbahnbeginn. Dies ist auch im Zusammenhang mit Makrolon TC110 und Makrolon TC210 zu erkennen. Somit führen hohe Schmelztemperaturen des metallischen Lots und niedrige Kollengeschwindigkeiten zu besseren Leitfähigkeitswerten am Leiterbahnende im Vergleich zum Anfang.

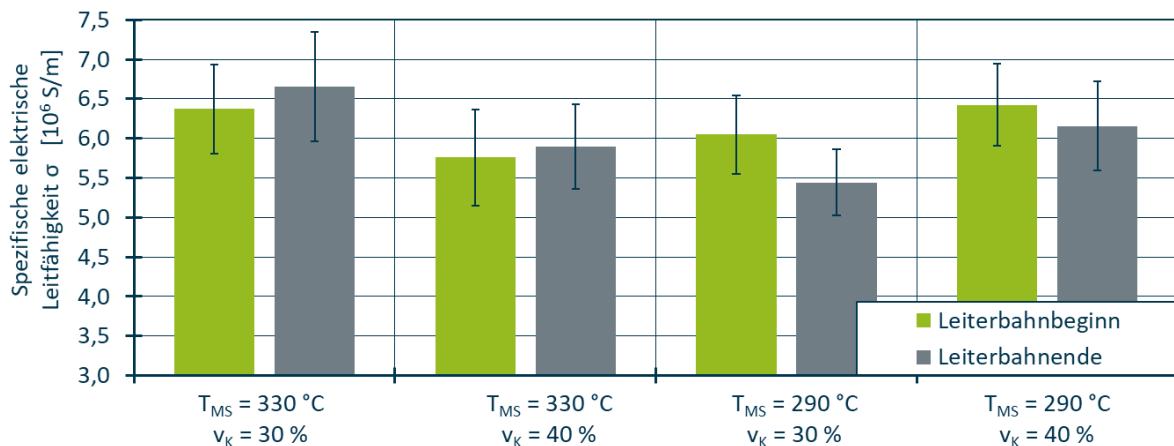


Abbildung 14: Vergleich der Leitfähigkeit zwischen Leiterbahnbeginn und -ende (am Beispiel von Makrolon TC210)

Im Anschluss erfolgte eine Analyse hinsichtlich der Bauteilerwärmung bei konstanter Strombelastung, um dadurch Rückschlüsse auf einen möglichen Wärmeabtransport durch die thermisch leitfähigen Kunststoffe ziehen zu können. Zur Messung der Bauteilerwärmung wurde der jeweilige Probekörper eingespannt und ein Netzteil des Typs HCS-3600 (Manson Engineering Industrial Ltd., Hongkong, China) durch zwei Aufsatzelektroden am Anfang und am Ende der Leiterbahn angeschlossen. Es erfolgten Messungen über 20 Minuten bei einer Bestromung von 20 A. Die Temperatur wurde mit Hilfe einer Infrarotkamera der Flir Systems Inc., Wilsonville, USA, gemessen. Durch die Messungen lässt sich ein Einfluss der wärmeleitfähigen Materialien Makrolon TC110 und Makrolon TC210 auf die Erwärmung der Bauteile erkennen. Abbildung 15 zeigt exemplarisch die Gegenüberstellung der Bauteilmaximaltemperatur (Temperatur über den Kunststoffträger und die Leiterbahn) und die Endtemperatur (Temperatur am Kunststoffträger) für alle drei Kunststoffe bei jeweils gleichen Herstellungsparametern. Im Vergleich zum Referenzmaterial ist bei den wärmeleitfähigen Materialien die maximale Bauteiltemperatur um bis zu 16 % niedriger. Die Temperatur des Kunststoffträgers bei den thermisch leitfähigen Materialien ist hingegen höher als bei Makrolon 2405. Es ist demnach eine Wärmeableitung von der Leiterbahn über den Kunststoffträger bei Makrolon TC110 und Makrolon TC210 erkennbar, weshalb wärmeleitfähige Trägermaterialien hinsichtlich der Bauteilerwärmung vorteilhaftere Bauteileigenschaften hervorbringen als nicht wärmeleitfähige Trägermaterialien, was zu erwarten war.

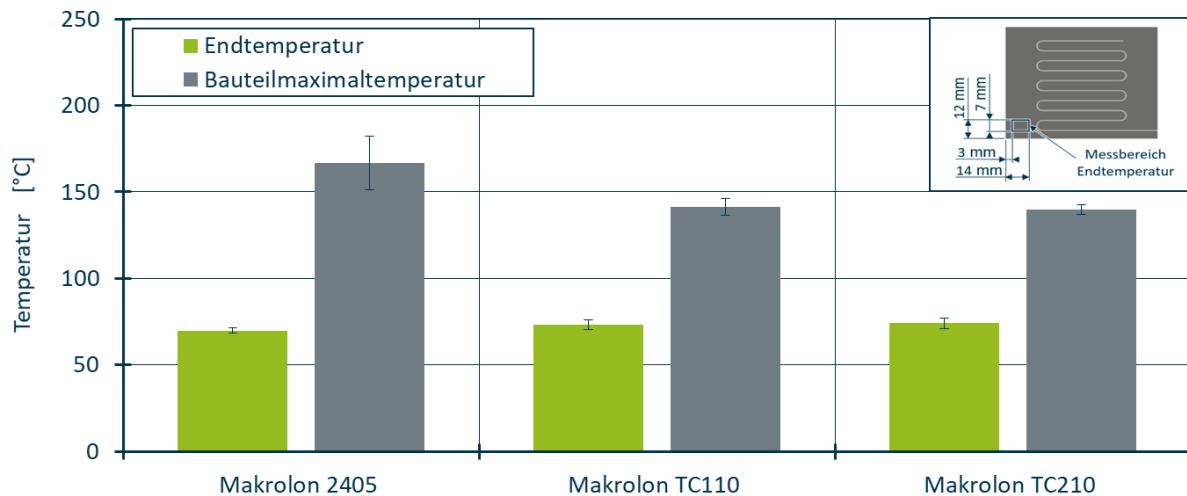


Abbildung 15: Vergleich zwischen Bauteilmaximal- und Endtemperatur

Abschließend erfolgten Prüfungen in Anlehnung an die VW 80000, um die Eignung von IMKS-Bauteilen für Automobilanwendungen zu klassifizieren. Dazu erfolgte zunächst eine Belastung durch einen Stufentemperaturtest (25 °C bis 125 °C), durch einen Vibrationstest und durch einen mechanischen Schock. Die Beurteilung hinsichtlich eines Einflusses der jeweiligen Belastung wurde anhand von Messungen der elektrischen Leitfähigkeit der Leiterbahn vor und nach den entsprechenden Prüfungen vorgenommen. Die Messungen der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit nach dem Stufentemperaturtest haben in nahezu jeder Versuchspunktkombination zu einem Abfall der Leitfähigkeit geführt. Neben der Abnahme der Leitfähigkeit durch den Stufentemperaturtest, zeigt sich eine verstärkte Abnahme der Leitfähigkeit bei gleichzeitig höherer Wärmeleitfähigkeit der Kunststoffe. Die Probekörper aus Makrolon TC110 und Makrolon TC210 haben sich während der Prüfung mehr aufgeheizt als die des Referenzmaterials. Dies stellt eine zusätzliche thermische Belastung für die Leiterbahn dar. Ein Einfluss der mechanischen Prüfungen auf die spezifische elektrische Leitfähigkeit ist nicht erkennbar.

Zusammenfassend sollten spritzgießseitig niedrige Schmelze- und Werkzeugtemperaturen sowie ein niedriger Nachdruck gewählt werden. Druckgießseitig sollten hohe Schmelztemperaturen des metallischen Lots gewählt werden. Hinsichtlich der Bauteilerwärmung zeigte sich, dass wärmeleitfähige Trägermaterialien vorteilhaftere Bauteileigenschaften im IMKS hervorbringen können als nicht wärmeleitfähige Trägermaterialien. Zudem zeigte sich eine grundlegende Eignung der IMKS-Bauteile entsprechend der VW 80000.

Verbundfestigkeit von Kunststoff und Metalllot

Aufbauend darauf wurden Untersuchungen hinsichtlich der Hafteigenschaften zwischen Kunststoff und Leiterbahn durchgeführt. Ziel der Untersuchungen war die Charakterisierung der vorliegenden Haftungsmechanismen des Lots im Zusammenhang mit den drei Kunststoffen. Ferner sollten ein Vergleich des Einflusses von wärmeleitfähigen Kunststoffen auf die resultierende Haftung zwischen Leiterbahn und Kunststoffträger verglichen mit nicht-wärmeleitfähigen Kunststoffen vorgenommen werden. Zur Analyse werden Rollenschälversuche sowie mikroskopische Untersuchungen vorgenommen.

Die dazu gewählten Probekörper haben eine Länge von 104,4 mm und eine Breite von 14,47 mm sowie einer Dicke von 3 mm (Abbildung 16). Um die Probekörper in die Vorrichtung für die Rollschälversuche einspannen zu können, ist ein 20 mm langer Abschnitt am Fließwegende der Leiterbahn vorgesehen, welcher entsprechend über die Länge der Nut im Kunststoffträger hinausgeht. Die Leiterbahn hat demnach eine Gesamtlänge von 124,4 mm, die Nut im Kunststoffträger hat eine Länge von 104,4 mm.

Die Probekörper wurden an der Spritzgießmaschine Demag Ergotech 80/420-310 der Firma Sumitomo (SHI) Demag Plastics Machinery GmbH hergestellt.

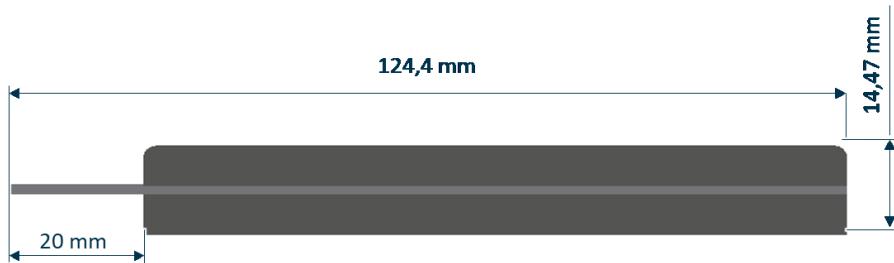


Abbildung 16: Probekörper zur Untersuchungen der Hafteigenschaften zwischen Kunststoff und Leiterbahn

Um einen Einfluss der Kunststoffträgermaterialien auf die Haftung zwischen Leiterbahn und Kunststoffträger beurteilen zu können, wird der Vergleich exemplarisch bei einem Spritzgießversuchspunkt diskutiert. Hierbei werden alle Druckgießversuchspunkte und alle Kunststoffträgermaterialien miteinander verglichen (Abbildung 17). Es zeigt sich, dass bei zunehmender Wärmeleitfähigkeit des Kunststoffträgermaterials die Haftung zwischen Leiterbahn und Träger die benötigte Schälkraft zur Lösung dieser Haftung steigt. Eine große Differenz zwischen den benötigten Schälkräften für die Trennung der beiden Werkstoffe fällt beim Vergleich zwischen Makrolon TC210 und den anderen beiden Materialien auf. Es wird bei nahezu allen Druckgießversuchspunkten eine doppelt so hohe Schälkraft für die Trennung des Haftverbunds im Zusammenhang mit Makrolon TC210 benötigt, verglichen mit den anderen beiden Kunststoffträgermaterialien. Dabei kann eine Steigerung der benötigten Schälkraft bei der Verwendung von Makrolon TC210 im Vergleich zu Makrolon 2405 um 146 % festgestellt werden. Der Unterschied zwischen der benötigten Schälkraft bei den Prüfkörpern mit Makrolon 2405 und Makrolon TC110 ist hingegen nur gering, wobei eine höhere Schälkraft bei Makrolon TC110 benötigt wird.

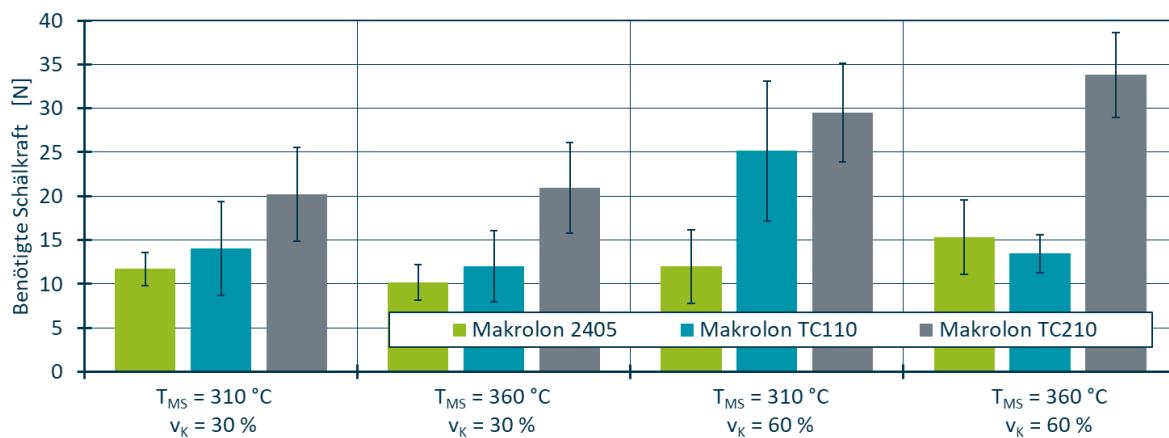


Abbildung 17: Benötigte Schälkraft bei varierten Druckgießparameter

Zur Identifikation des Haftungsmechanismus zwischen Leiterbahn und Kunststoffträger werden Aufnahmen durch ein Feldemissionsrasterelektronenmikroskop (FESEM) des Typs ZEISS Sigma VP der Carl Zeiss Microscopy Deutschland GmbH, Oberkochen angefertigt und ausgewertet. Diese ermöglichen die detaillierte Betrachtung der Grenzschicht und die Analyse der Haftungsart (Abbildung 18) Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.

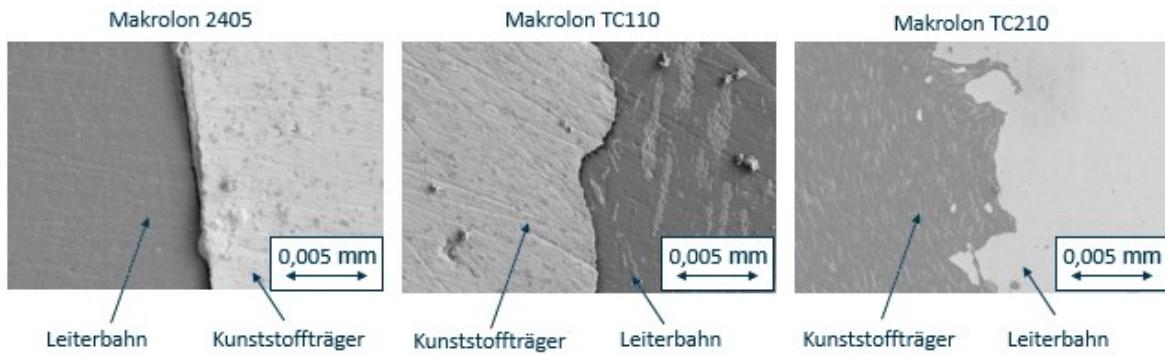


Abbildung 18: FESEM-Aufnahmen von dem Metall-Kunststoffverbund

Bei Betrachtung der Aufnahme der Grenzschicht zwischen Kunststoffträger und Leiterbahn von Makrolon 2405 zeigt sich eine glatte, porenefreie Kunststoffoberfläche, bei der eine Verankerung der metallischen Schmelze nicht möglich ist. Die vorliegende Haftung ist ein Resultat aus einem Kraftschluss an der Grenzschicht, welcher jedoch durch den vorliegenden Spalt, welcher auf Verzug zurückzuführen ist, an Haftungsqualität verliert. Makrolon TC110 weist hingegen eine unebenere Oberfläche des Kunststoffträgers im Vergleich zu Makrolon 2405 auf. Es sind Tendenzen einer mechanischen Verankerung ersichtlich und demnach einer mechanischen Adhäsion. Dennoch liegt überwiegend ein Kraftschluss vor. Bei Makrolon TC210 zeigt sich eine mechanische Adhäsion. Die Grenzschicht weist weiterhin keine weiteren Spalten auf.

Wärmeabfuhr mittels wärmeleitender Kunststoffe

Abschließend wurden Untersuchungen hinsichtlich der Anbindung von elektrischen Einlegern (für die Versuche wurden dazu Kontaktstifte der LED genutzt) vorgenommen, da auch beim Demonstratorbauteil Einlegeteile durch das IMKS kontaktiert werden. Im Zuge dessen erfolgten Untersuchungen inwieweit die resultierende Wärmeentwicklung durch thermisch leitfähige Kunststoffe reduziert werden kann. Die dazu hergestellten Probekörper haben eine Länge von 90 mm, eine Breite von 14,5 mm und eine Dicke von 3 mm (Abbildung 19). Am Ende der 80 mm langen Leiternut befindet sich eine Dichtstelle, an der der Einsatz positioniert und abgedichtet wird. Der Einleger ist so positioniert, dass 5 mm des Einlegers mit der metallischen Schmelze umspritzt werden.

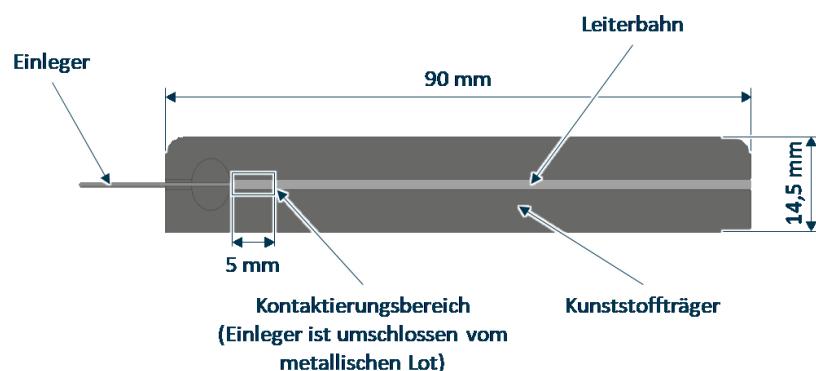


Abbildung 19: Probekörper zur Untersuchung der Anbindung von Einlegern

Zur Messung der Bauteilerwärmung wurde der jeweilige Probekörper eingespannt und ein Netzteil des Typs HCS-3600 der Manson Engineering Industrial Ltd., Hongkong, China, durch zwei Aufsatzelektroden am Anfang der Leiterbahn und am Drahtleiner angeschlossen. Es erfolgten Messungen über 10 Minuten bei einer Bestromung von 5 A. Die Temperatur wurde mit Hilfe einer Infrarotkamera der Flir Systems Inc., Wilsonville, USA, gemessen. Zu Auswertung wurden verschiedene Messbereiche definiert (Abbildung 20).

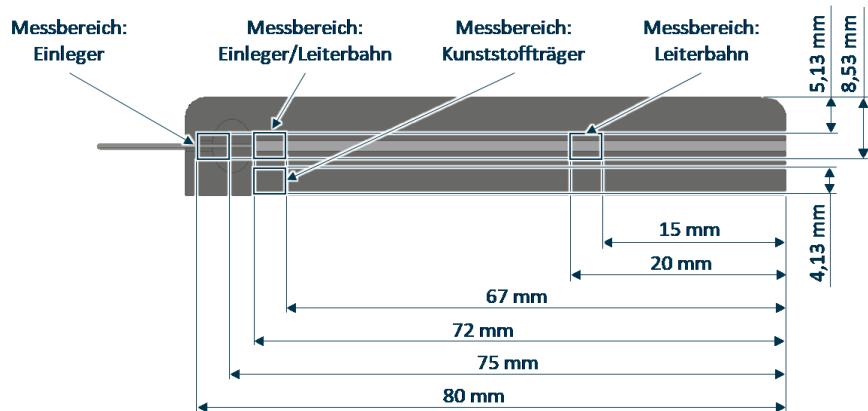


Abbildung 20: Messbereiche für die Stromtragfähigkeitsmessungen

Ein Vergleich der Bauteilerwärmung pro Trägermaterial und Kolbengeschwindigkeit für die verschiedenen Messbereiche zeigt eine Wärmeabfuhr aus den Leiterbahnen und der Kontaktstelle bei Prüflingen mit Makrolon TC110 und Makrolon TC210 (Abbildung 21).

Die Messbereiche „Einleger“ und „Einleger/Leiterbahn“ mit den wärmeleitfähigen Trägermaterialien erreichen niedrigere Endtemperaturen als im Zusammenhang mit Makrolon 2405. Eine konkrete Aussage über den Messbereich "Leiterbahn" ist aufgrund der teilweise hohen Standardabweichung nicht möglich. Trotz der kühlenden Wirkung der Kunststoffträger, welche aus Makrolon TC110 und Makrolon TC210 gefertigt sind, kann für diese Probekörper keine signifikante Erwärmung des Messbereichs „Kunststoffträger“ festgestellt werden. Aufgrund der Wärmeleitfähigkeit von Makrolon TC210 konnte die Wärmeentwicklung im Messbereich „Draht/Leiterbahn“ um bis zu 21 % reduziert werden.

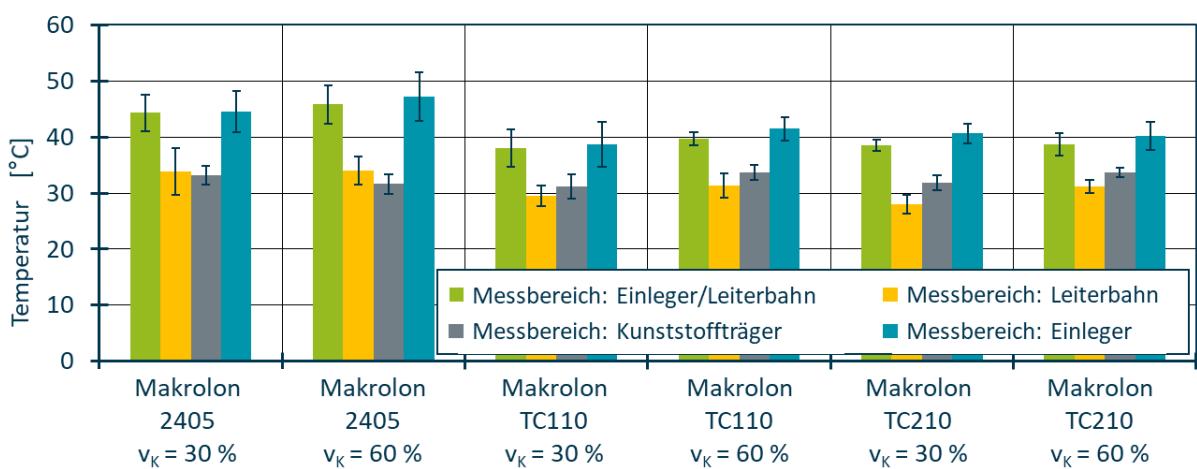


Abbildung 21: Bauteilerwärmung unter konstanter elektrischer Belastung von 5 A für 10 Minuten

Optische Komponente

Neben der Mediendichtheit und elektrischen Leistungsfähigkeit der Leuchte, ist die genaue Abformung der Optik wichtige für die resultierende Ausleuchtung der Kennzeichenleuchte. Dazu wurde die optische Komponente am IKV genauer untersucht und die Ergebnisse analysiert. Die Bauteile wurden auf der Spritzgießmaschine ENGEL e-motion 440/160 T WP am IKV hergestellt. Zuvor wurde in Voruntersuchungen die möglichen Prozessgrenzen der Parameter ermittelt und diese bei der Analyse nach der folgende Parameterliste in Tabelle 3 untersucht.

PMMA: Plexiglas 7N

Parameter	-1	0	+1
Schmelztemperatur (°C)	220	-	260
Nachdruck (bar)	700	1000	1300
Nachdruckzeit (s)	5	10	15
Einspritzgeschw. (mm/s)	15	-	25

PC: Makrolon LED2245

Parameter	-1	0	+1
Schmelztemperatur (°C)	250	-	300
Nachdruck (bar)	600	800	1000
Nachdruckzeit (s)	8	5	13
Einspritzgeschw. (mm/s)	14	-	22

Tabelle 3: Untersuchte Prozessparameter der Kunststoffoptik

Die hergestellten Linsen werden anschließend mit einem Weißlichtinterferometer des Zeiss O-Inspect-442 der Carl Zeiss IQS Deutschland GmbH, Oberkochen, vermessen, um die Qualität der Linsen und die Auswirkung der Parameter auf das Teil zu bestimmen, indem das Verhältnis zwischen der tatsächlichen Oberflächengeometrie und der theoretischen Geometrie verglichen wird. Zur einfacheren Messung werden einzelne Linien, die in Abbildung 22 in Rot dargestellt sind, auf der Bauteiloberfläche zur Messung abgefahren. Die Linien 1 und 2 liegen auf der ebenen Außenfläche und geben eine Information über die Schwindung und den Verzug, die Linien 3 und 4 liegen im optisch relevanten Teil auf der Linsenninnenseite und lassen auf die Abformungsgüte der Linsengeometrie schließen.

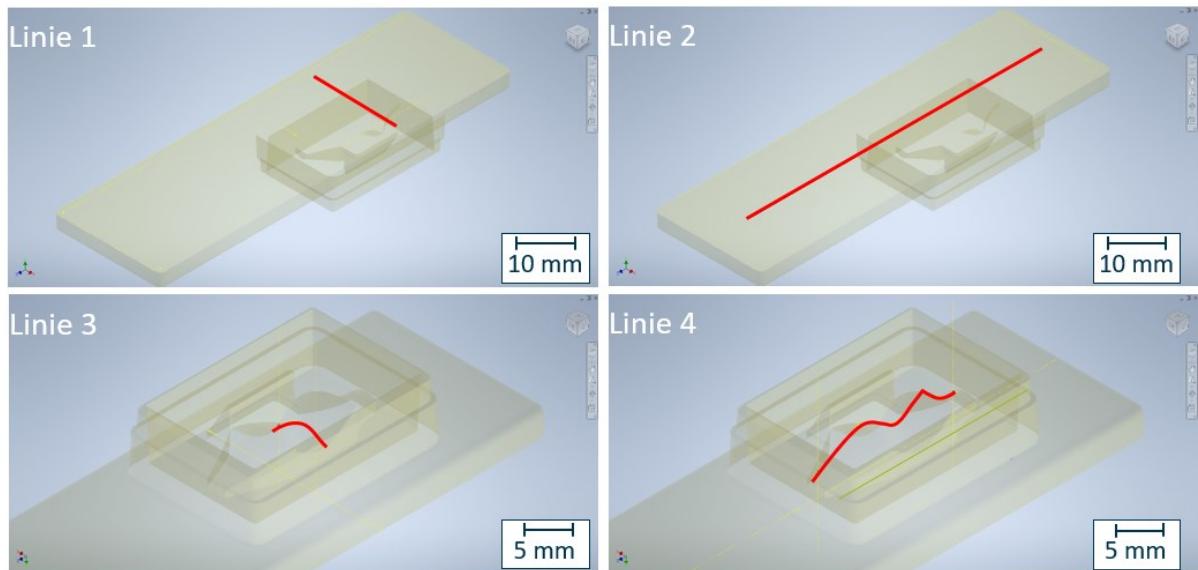


Abbildung 22: Mittels Weißlichtinterferometrie vermessene Oberflächenlinien

Die Ergebnisse der Messung entlang der Messlinie 2 in Abbildung 23 zeigen, dass die Abformgenauigkeit von PMMA deutlich stabiler gegenüber Prozessänderungen ist. Ebenso ist die Abweichung der Bauteile zur Zielgeometrie signifikant geringer mit 0,16 mm im Durchschnitt als bei PC mit 0,23 mm im Durchschnitt. Innerhalb der Versuchspunkte ist die Standardabweichung bei beiden Materialien ähnlich. So zeigen eine hohe Schmelztemperatur bei niedrigem Nachdruck und hoher Einspritzgeschwindigkeit bei PMMA und PC eine erhöhte Schwankung in den Ergebnissen.

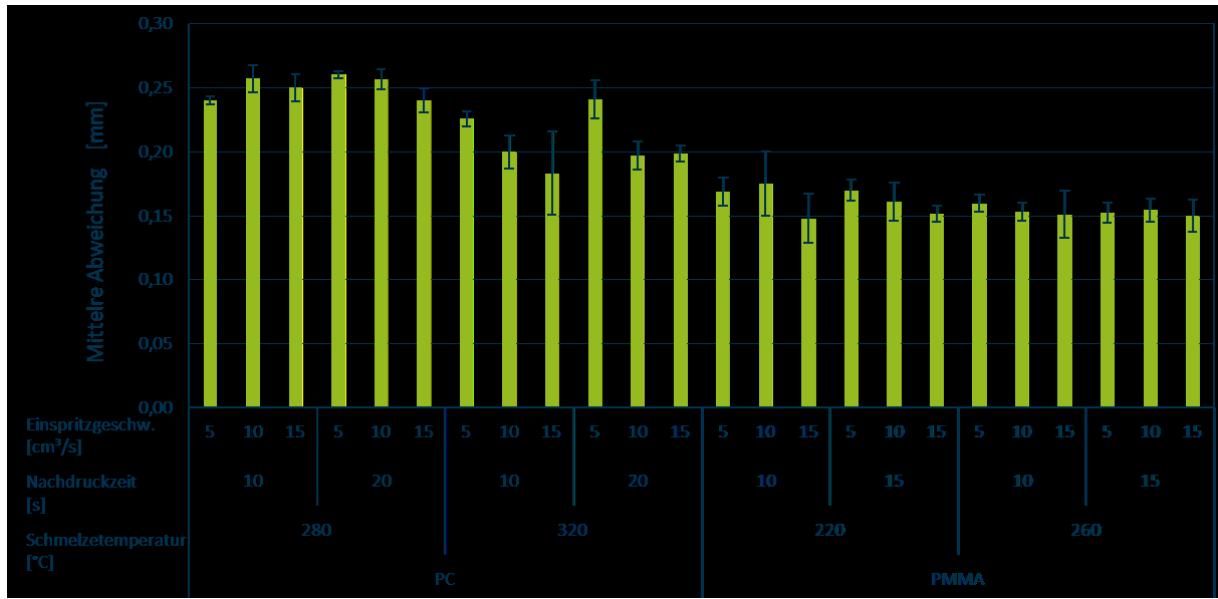


Abbildung 23: Mittlere Abweichung der untersuchten Bauteile von der Zielgeometrie entlang der Messlinie 2

Bei Betrachtung des Linsenbereichs mittels der Messlinie 4 in Abbildung 24 wird eine größere Abweichung zur Zielgeometrie im Durchschnitt von 0,31 mm ersichtlich. Ebenso ist in dem optisch relevanten Bereich die Abweichung von Linsen aus PC um 12% besser als aus PMMA. Bei der zuvor gemessenen Linie 2 ist die Abweichung von PC noch um 45 % schlechter als von PMMA.

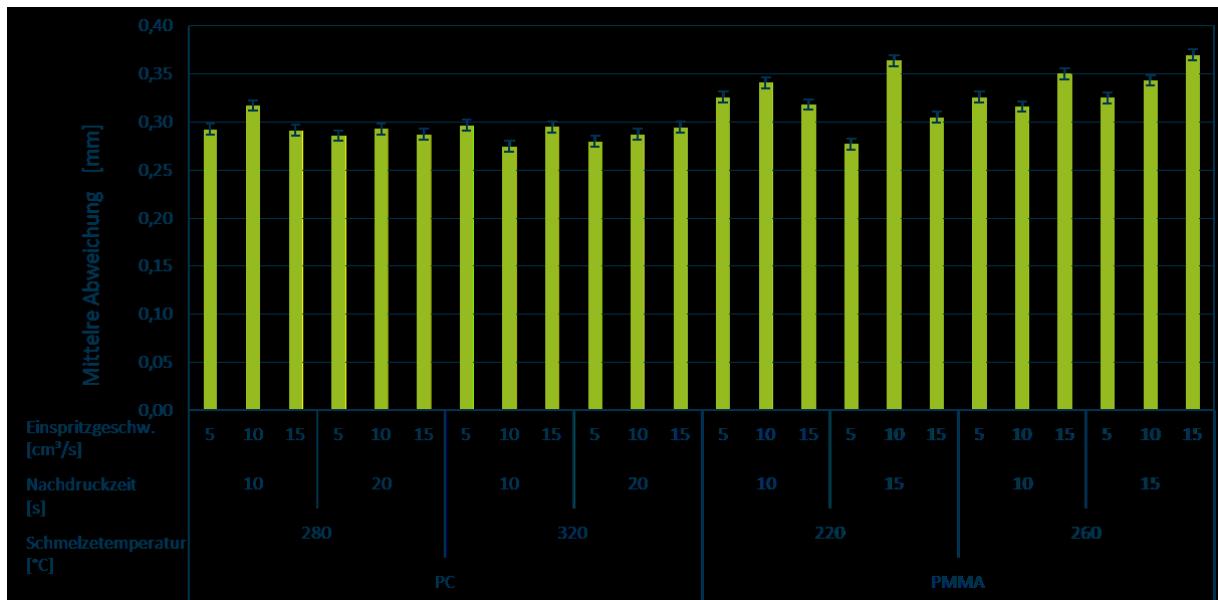


Abbildung 24: Mittlere Abweichung der untersuchten Bauteile von der Zielgeometrie entlang der Messlinie 4

Insgesamt über alle Messlinien betrachtet, zeigt sich eine um 12 % geringere Abweichung der PMMA-Linsen. Dieses Ergebnis und die materialbedingte bessere Kratzfestigkeit befürworten einen Einsatz von PMMA für die Kunststoffoptik in der Kennzeichenleuchte. Weitere Untersuchungen zu Ausleuchtung wurde mit den hergestellten Optiken durch den Projektpartner Mentor GmbH durchgeführt.

Demonstratormontage

Im Rahmen der Demonstratorherstellung und der anschließenden Bauteilanalyse erfolgte die Demonstratorherstellung in vier Fertigungsschritten. Im ersten Schritt erfolgte die Herstellung des Vorspritzlings mit Kontaktstiften, in Fertigungsstufe 2 wurden Leiterbahnen mittels IMKS hinzugefügt,

die Platine wurde händische mit Hilfe von Positionsstifte eingesetzt (Abbildung 25). In Fertigungsstufe 3 wurde eine Ummantelung gespritzt, zudem erfolgte die Positionierung der Optik. Abschließend wurde ein Rahmen, welcher Ummantelung und Optik verbindet, hinzugefügt.



Abbildung 25: Die Kennzeichenrückleuchte in verschiedenen Fertigungsstufen

Anhand definierten Messstrecken an Fertigungsstufe 2 und 3 wurden anschließend Verzugsmessungen durchgeführt. Beispielsweise sind in Abbildung 26 die Ergebnisse der Messungen von der Unterseite von Fertigungsstufe 3 dargestellt. Es zeigt sich im Zusammenhang mit allen drei Kunststoffträgern ein sehr geringer Verzug. Dabei hat Makrolon 2405 den vergleichsweise höchsten Verzug (Messstrecke 3.1 und 3.2). Die Messstrecke 3.3 liegt auf der Fläche des Steckers, an dem die Kennzeichenleuchte mit dem Kraftwagen verbunden wird. Dieser kritische Bauteilbereich zeigt die geringste Abweichung bei den Verzugsmessungen des Gesamtbauteils.

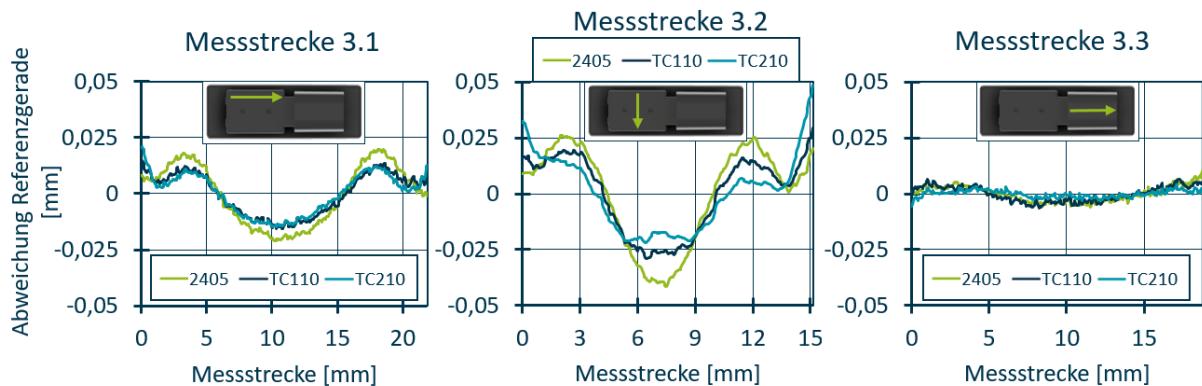


Abbildung 26: Mittelwerte der Abweichungen von den Referenzgeraden der Unterseite bei Fertigungsstufe 3

Die Ergebnisse der Untersuchungen am IKV zeigen, dass die Anforderungen, die an den Demonstrator am Anfang des Projekts gestellt wurden, bezüglich der Verbundfestigkeit, Mediendichtheit, elektrischen Leitfähigkeit und der Abformgenauigkeit des optischen als auch des Gesamtbauteils erfüllt wurden. Weitere Untersuchungen der Gesamtleuchte wurden beim Projektpartner Mentor GmbH durchgeführt und zeigen, dass eine solche Leuchte die generellen Anforderungen für eine Leuchte im Automotivbereich erfüllt.

- Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten:**

Wie aus der Beschreibung (Teil I und II) hervorgeht, sind im Rahmen des Forschungsprojekts umfangreiche Untersuchungen durchgeführt worden. Die Vielzahl der durchgeföhrten Untersuchungen zeigen, dass die geleistete Arbeit und der Einsatz der Ressourcen angemessen und notwendig waren. Notwendige Anpassungen in den Arbeitspaketen haben nicht zu einer Reduktion des Arbeitsumfangs geführt, sondern es wurden einzelne Maßnahmen durch

geeignetere Maßnahmen ersetzt, weshalb der Umfang der Forschungsarbeiten sich nicht verändert hat.

Darüber hinaus zeigen die Ergebnisse und die erarbeiteten Erkenntnisse, dass die Entwicklung und die geplante Umsetzung der Kennzeichenrückleuchte grundsätzlich funktioniert. Es zeigt aber auch, dass noch konstruktionstechnische Optimierungsmaßnahmen am Bauteil denkbar sind, um den Verzug von Fertigungsschritt 4 zu optimieren. Die Untersuchungen erfolgten dazu beim Projektpartner Mentor GmbH. Ferner sollte der Anguss der Optik hinsichtlich Art und Position in nachfolgenden Arbeiten optimiert werden. Daher sind weitere Untersuchungen zur Weiterentwicklung von komplexen Beleuchtungssystemen notwendig, um das Potenzial vollständig zu nutzen.

Insgesamt konnte die Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit bestätigt werden.

- **Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses - auch konkrete Planungen für die nähere Zukunft - im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans**

Das IKV konnte im Rahmen des Vorhabens seine material- und verarbeitungstechnischen Kompetenzen in den Bereichen des IMKS und der Optik verbessern. Zudem wird eine Dissertation von Frau Sturm zum IMKS, welche Forschungsergebnisse, die im Rahmen des Projekts erarbeitet wurden, beinhaltet, angestrebt.

Ferner wurden die Projektergebnisse in Form von Workshops, Fachtagungen, Konferenzen und Seminaren einem breiten Fachpublikum präsentiert.

- **Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordenen Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen**

Während der Durchführung des Verfahrens ist kein Fortschritt von anderen Stellen bekannt geworden.

- **Erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses**

➤ Erfolgte Veröffentlichungen:

- Hopmann, Ch.; Sturm, I., Gerads, J.: Herstellung einer Kennzeichenrückleuchte in einer hochintegrierten Spritzgießfertigungszelle - Welche Materialkombination passt?. *Kunststoffe* 122 (2022) 1, S. 46-49
- Hopmann, Ch.; Sturm, I., Gerads, J.: Manufacture of a Rear License Plate Light in a Highly Integrated Production Cell What Is the Most Suitable Material Combination?. *Kunststoffe International* 122 (2022) 1, S. 48-51
- Sturm, I., Hopmann, Ch.; Koyuncu, C.: Einflüsse von Material- und Prozessparametern beim IMKS unter Verwendung von wärmeleitfähigen Kunststoffen. *Zeitschrift Kunststofftechnik* 19 (2023) 1, S1.-26

➤ Geplante Veröffentlichungen:

- Abschlussveröffentlichung Kunststoffe Erscheinungstermin: tba

Teil III: Erfolgskontrollbericht

1. Das Verbundprojekt „ISI-LED“ wurde auf Basis der Fördermaßnahme "Photonik nach Maß – Funktionalisierte Materialien und Komponenten für optische Systeme der nächsten Generation" im Rahmen des Förderprogramms "Photonik Forschung Deutschland" vom 02. September 2016

initiiert. In dem Forschungsvorhaben wurden folgende bzw. Entwicklungs- sowie Untersuchungsthemen betrachtet:

Die Entwicklung des LED-Beleuchtungssystems, welches in einer hochautomatisierten und hochintegrierten Fertigungszelle herstellbar ist, stellt einen neuen technischen Lösungsansatz dar. Durch den Einsatz neuartiger Materialien für Gehäuse und Leiterbahnen und die Nutzung optischer Freiformgeometrien, wurden innovative Bestandteile für die Realisierung des Beleuchtungssystems kombiniert. Darüber hinaus wurden die steigenden Anforderungen hinsichtlich Funktionsintegration, der wirtschaftlichen Herstellung in einer modularen Großserienfertigung sowie der stetig zunehmenden Miniaturisierung berücksichtigt. Der verkürzte Herstellungsprozess, der in einer Fertigungszelle möglich ist, zeichnet sich durch eine hohe Präzision bei vergleichsweise kurzer Prozesszeit und einer hohen Automatisierbarkeit aus. Im Rahmen des Projekts wurde ein umfangreiches theoretisches Prozessverständnis zur Herstellung der Leuchte erarbeitet, das auf dem aktuellen Stand der Forschung aufbaut.

Das gemäß dem Vorhaben entwickelte LED-Beleuchtungssystem mit Vorsatzoptik eignet sich aufgrund der beim Projektpartner skizzierten, modular aufgebauten Fertigungszelle für eine variantenreiche Großserienproduktion am Hochlohnstandort Deutschland.

2. Wie im Rahmen der ausführlichen Darstellungen im Bericht zu diesem Forschungsvorhaben dargestellt, wurden die angestrebten Ziele erreicht. Grundlage der Untersuchungen bezüglich der Entwicklung einer integrierten Spritzgießtechnologie für LED-Lichtquellen mit Vorsatzoptik (ISI-LED) bilden die Voruntersuchungen der ausgewählten Materialien. Hierzu wurden Analysen zur Verbundfestigkeit von 2K-Kunststoffverbindungen zwischen optischen und thermisch leitenden Thermoplasten sowie Untersuchungen zur Mediendichtigkeit durchgeführt. Daraus lässt sich ableiten, ob eine Herstellung einer Kennzeichenleuchte für den Automotivbereich grundsätzlich für den Außenbereich mit Medieneinflüssen möglich ist. Beim aktuellen Herstellungsverfahren wird das optische Bauteil mit dem Gehäusebauteil verschweißt und durch eine mediendichte Umspritzung der Bauteile, lässt sich eine zusätzliche Verarbeitungstechnik einsparen. Die Ergebnisse zeigen, dass 2K-Bauteile aus PC-Grundmaterial und einem optischen Material aus PC oder PMMA die gleiche Mediendichtheit aufweisen, wie die reinen Ausgangsmaterialien.

Die Entwicklung der Werkzeuge zur Umsetzung der integrierten Spritzgießtechnologie für LED-Lichtquellen mit Vorsatzoptik wurde mit Spritzgießsimulationsuntersuchungen unterstützt. Dabei wurde vor allem der Anguss der Vorsatzoptik untersucht und eine Position gewählt, die eine schnelle Bauteilfüllung und geringe Doppelbrechungen erzielt, womit eine bessere Ausleuchtung möglich sein sollte. Des Weiteren wurden die Bauteilfüllung und die Deformation der weiteren Bauteile betrachtet und analysiert.

In weiteren Grundlagenuntersuchungen wurden die Verbindung von Kunststoff und Metalllote zur Kontaktierung der LED-Lichtquelle untersucht. Dabei wurde an vereinfachten Probekörpergeometrien für den Kunststoffträger neben dem Standardgehäusematerial Makrolon 2405 die zwei thermisch leitfähigen Kunststoffe Makrolon TC110 und TC210 (alle drei: Covestro AG, Leverkusen) verwendet. Als Leiterbahnmaterial wurde das Lot Sn100Ni+ (Felder GmbH Lottechnik, Oberhausen) verwendet. Es wurden prozess- und materialbedingte Verarbeitungsrichtlinien entwickelt sowie Erkenntnisse hinsichtlich des möglichen Wärmeabtransports durch die thermisch leitfähigen Kunststoffe gewonnen. Ferner wurde die Eignung von IMKS-Bauteilen für Automobilanwendungen durch Normprüfungen gemäß VW 80000 geprüft. Spritzgießseitig sollten niedrige Schmelze- und Werkzeugtemperaturen sowie ein niedriger Nachdruck gewählt werden, da damit eine bessere Platzierung der Trägerbauteile im Werkzeug geben ist. Druckgießseitig sollten hohe Schmelzetemperaturen des metallischen Lots gewählt werden. Hinsichtlich der Bauteilerwärmung zeigte sich, dass wärmeleitfähige Trägermaterialien vorteilhaftere Bauteileigenschaften im IMKS hervorbringen können als nicht

wärmeleitfähige Trägermaterialien. Zudem zeigte sich eine grundlegende Eignung der IMKS-Bauteile entsprechend der VW 80000. Des Weiteren wurden zum besseren Prozessverständnis Simulationen der einzelnen Bauteile der ISI-LED Leuchte durchgeführt und analysiert. Dabei wurde vor allem das Schwindungs- und Verzugspotenzial, aber auch das Füllverhalten aufgrund der Angusspositionierung und mögliche Bauteilfehler betrachtet.

Aufbauend auf den Grundlagenuntersuchungen wurde anschließend bei den Projektpartnern Spritzgießwerkzeuge und Formeinsätze zur Herstellung des Demonstrators gefertigt und abgemustert. Mit diesen Werkzeugen konnte am IKV Vorsatzoptiken hergestellt und untersucht und diese beim Projektpartner Krallmann GmbH in Zusammenarbeit mit dem IKV erfolgreich in Kennzeichenleuchten mit hochintegrierter Spritzgießtechnologie verarbeitet werden.

3. Anhand der Erfahrungen aus dem Konsortium wurde ein Konzept für eine Fertigungszelle durch den Projektpartner Krallmann GmbH skizziert, die eine Herstellung der entwickelten LED-Leuchte ermöglicht. Des Weiteren wurde eine erste Abschätzung der Wirtschaftlichkeit durchgeführt. Diese ist im Bericht der Fa. Krallmann GmbH enthalten.
4. Die Arbeiten des Forschungsprojekts wurden entsprechend der Kompetenzen der Projektpartner in Arbeitspakete aufgeteilt. In monatlichen Projekttreffen und zahlreichen bilateralen Treffen und Gesprächen wurde eine enge Kooperation realisiert. Durch die sehr enge Kooperation konnte gewährleistet werden, dass ausschließlich die Ansätze verfolgt wurden, die Lösungen lieferten.
5. Die erarbeiteten Erkenntnisse werden im Rahmen von Fachvorträgen und in der Lehre des IKV einem breiten Publikum zugänglich gemacht. Im Rahmen der jährlich stattfindenden Fachbeiratsgruppen wurden die aktuellen Forschungsergebnisse den Mitgliedern der Fördervereinigung bereits präsentiert und zur Diskussion gestellt. Eine umfassende Präsentation der Forschungsschwerpunkte wird weiterhin im Rahmen des alle zwei Jahre stattfindenden IKV-Kolloquiums und im Rahmen des sich anschließenden „IKV360°“, einer Begehung der Technika am IKV, erfolgen. Außerdem sind Veröffentlichungen der Forschungsergebnisse in nationalen und internationalen Zeitschriften erfolgt und im Weiteren geplant: Erste Ergebnisse wurden bereits in der Zeitschrift Kunststoffe 1/2022 veröffentlicht. Zudem wird eine Dissertation von Frau Sturm zum IMKS angestrebt, welche Forschungsergebnisse, die im Rahmen des Projekts erarbeitet wurden, beinhaltet.
6. Die Arbeiten lagen insgesamt innerhalb des vorgesehenen Ausgabenrahmens, konnten jedoch aufgrund der Übernahme eines Projektpartners und Konsortialführers sowie der anschließenden Insolvenz des Projektpartners nur mit großem Verzug fertiggestellt werden. Dies lag unter anderem daran, dass ein neuer Kooperationsvertrag erstellt werden musste sowie Arbeiten an der Herstellung der Spritzgießwerkzeuge zur Untersuchung des Demonstrators und der Prozesseinstellungen erst mit großen Zeitverzug durchgeführt wurden. Dadurch musst das Projekt verlängert und der ursprünglich Zeitplan auf den Verzug angepasst werden. Die Fertigungszelle wurde dadurch bedingt nicht vollumfänglich beim entsprechenden Projektpartner hergestellt und erprobt. Es wurden dennoch alle herstellungsrelevanten Prozesse untersucht und mittels mehreren im Projekt gefertigten Werkzeugen ein funktionierender Demonstrator hergestellt.

Literaturverzeichnis

- [AM10] ANGERMAIER, K.; MÜLLER, P.: Zeit und Kosten sparen. *Kunststoffe* 100 (2010) 4, S. 73-76
- [DS06] DÖBLER, M.; SCHIEMANN, F.: Linsenoptiken von LEDs aus Polycarbonat. *Kunststoffe* 96 (2006) 11, S. 116-117
- [HS19] HOPMANN, CH.; STURM, I.: Langzeitbeständige Leiterbahnen - Prozesssimulationen zum Optimieren des Integrierten Metall/Kunststoff-Spritzgießens. *Plastverarbeiter* 70 (2019) 10, S. 96-99
- [HS20] HOPMANN, CH.; STURM, I.: Kontaktierungen mit dem Integrierten Metall/Kunststoff-Spritzgießen- die Gestaltung ist entscheidend. *Plastverarbeiter* 71 (2020) 12, S. 96-99
- [HSJ22] HOPMANN, CH.; STURM, I.; GERADS, J.: Welche Materialkombination passt? *Kunststoffe* 112 (2022) 1, S. 46-49
- [Kec12] KECK, B.: licht im Dunkel geprägt- Spritzprägen von LED-Vorsatzlinsen. *Plastverarbeiter* 65 (2012) 8, S. 30-31
- [Mal11] VON MALM, N.: *LED-Lichtquellen und -Lampensysteme mit Polymeroptiken (POLO). Abschlussbericht zum Forschungsprojekt: LED-Lichtquellen mit integrierter Optik.* OSRAM Opto Semiconductors GmbH, Regensburg, 2011
- [NN19] N.N.: *DIN EN ISO 527-2 Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 2: Prüfbedingungen für Form- und Extrusionsmassen*, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2019