

Abschlussbericht

Projekt: „OptiTemp“

Optimierung des Wärmeübergangs in Temperierungssystemen zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit

Ausführende Stelle:

Technische Hochschule Köln, Fakultät für Informatik und Ingenieurwissenschaften

Projektleitung:

Prof. Dr.-Ing. Denis Anders
Steinmüllerallee1, 51643 Gummersbach
Telefon: 02261-8196-6372
E-Mail: denis.anders@th-koeln.de

Förderkennzeichen: 13FH012PX8

Projektlaufzeit: 01.10.2019 bis 31.03.2023

Inhaltsverzeichnis

1. Kurzdarstellung.....	1
1.1 Aufgabenstellung.....	1
1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	2
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens	3
1.4 Wissenschaftliche und technische Ausgangssituation	7
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	8
2. Eingehende Darstellung	9
2.1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse	9
2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	45
2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	45
2.4 Voraussichtlicher Nutzen der Ergebnisse des Vorhabens	45
2.5 Fortschritt auf dem Gebiet bei anderen Stellen.....	46
2.6 Veröffentlichung der Ergebnisse	46
3. Abbildungsverzeichnis.....	49
4. Tabellenverzeichnis	52
5. Literaturverzeichnis.....	53
6. Anhang: Berichtsblatt.....	55
7. Anhang: Bericht zu „Wirtschaftlichkeitsbetrachtung & Marketingkonzept“	57

1. Kurzdarstellung

In den letzten 20 Jahren war die Energieeffizienz als große gesellschaftliche Herausforderung ein wesentliches Entwicklungsthema in der Spritzgießtechnologie. Im Spritzgießprozess wird das Spritzgießwerkzeug auf eine Temperatur unterhalb der Erstarrungstemperatur des Kunststoffs temperiert, um ein formstabiles Formteil zu erhalten. Dafür werden Temperierkanäle mit einem Temperierfluid (meist Wasser) durchströmt, welches auf eine gewählte Temperatur temperiert wird. Die Energieeffizienz der Werkzeugtemperierung ist durch den Wärmeübergang im Temperierkanal des flüssigkeitstemperierten Spritzgießwerkzeugs beschränkt. Ein verbesserter Wärmeübergang ist somit der Schlüssel für Energieeinsparungen, vor allem bei der Rückkühlung des Temperierfluids. Durch einen optimierten Wärmeübergang lassen sich bei einer konventionellen Kälteanlage zumindest 20 % bis 70 % der aufgewendeten Energie einsparen [Stri2015,S.18f]. Alternativ zur Optimierung des Energiebedarfs der gesamten Temperiertechnik, kann ein intensivierter Wärmeübergang genutzt werden, um die Kühlzeit (bis zu 10 %) und somit die Zykluszeit zu verkürzen. Dies trägt ebenfalls zu einem reduzierten spezifischen Energiebedarf (Energiebedarf pro kg verarbeitetem Kunststoff) des Spritzgießzyklus bei. Ein weiteres Einsatzgebiet ist die dynamische Temperierung von Spritzgießwerkzeugen. Bei diesem Verfahren werden die Temperierkanäle wechselweise mit heißem Temperierfluid (Erzielung einer hohen Oberflächenqualität) und kaltem Temperierfluid (Erstarrung des Kunststoffs) durchströmt. Mit einem gesteigerten Wärmeübergangskoeffizienten kann ein schnellerer Wechsel der Werkzeugtemperatur herbeigeführt und somit die Kühlzeit reduziert werden (wie zuvor). Alle drei Einsatzgebiete haben somit eine optimierte Wirtschaftlichkeit zur Folge. Für die Nutzung dieses Potenzials liegen bisher keine Erkenntnisse im Hinblick auf maximal erzielbare Verbesserungen vor. Darüber hinaus ergibt sich ein Forschungsbedarf aus dem Fehlen von Strategien, um das Verbesserungspotenzial auch dauerhaft in der Praxis einsetzen zu können (z.B. zur Reduktion von Ablagerungen im Temperierkanal). Um dieses Thema ganzheitlich zu bearbeiten, wurde ein Konsortium gebildet, welches über Forschungskompetenz im Bereich Wärmeübertragung und Kunststoffverarbeitung (TH Köln), Entwicklungskompetenz für verfahrenstechnische Komponenten für optimierten Wärmeübergang (Striko Verfahrenstechnik GmbH), Entwicklungskompetenz in der Spritzgießsimulation (Simcon kunststofftechnische Software GmbH) und Entwicklungskompetenz für komplexe Spritzgießprozesse (Jokey Holding GmbH & Co. KG) verfügt.

1.1 Aufgabenstellung

In diesem Projekt sollen zwei Optimierungsansätze betrachtet werden. Einerseits beruht der Forschungsansatz auf dem Einsatz von statischen Mischelementen in Temperierkanälen von Spritzgießwerkzeugen, wie in [SS2014] und [Stri2015] vorgeschlagen. Dort wurde jedoch nur die grundlegende Wirksamkeit statischer Mischelemente nachgewiesen. Für einen breiten Praxiseinsatz muss die Geometrie der Mischelemente optimiert, um ein optimales ein verbessertes Wärmeübergangsverhalten, einen geringen Druckbedarf und geringe Ablagerungen zu erreichen. Für die thermische Auslegung und numerische Simulation müssen Modelle entwickelt werden, um den Wärmeübergang bei Verwendung von Mischelementen abzubilden. Der zweite zu untersuchende Ansatz besteht in der oszillierenden Anregung der Temperiermittelströmung (Pulsationsströmung). Dieses Verfahren wurde beispielsweise erfolgreich in Wärmeübertragern der Milchverarbeitenden Industrie angewendet [Boxl2011]. Eine Anwendung in der kunststoffverarbeitenden Industrie ist nicht bekannt. Ein weiterer Vorteil einer Pulsationsströmung ist die reduzierte Ablagerungsneigung [Boxl2011,S.10]. Im Bereich der Spritzgießtechnologie soll in diesem Projekt untersucht werden, ob sich bei einer Pulsationsströmung eine aufwendige Aufbereitung des Temperierwassers mit Biozid und Korrosionsschutz vermeiden lässt (geringere Umweltbelastung und Kostenreduktion).

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die Arbeitsgruppe um Prof. Denis Anders beschäftigt sich mit Forschungs- und Entwicklungsthemen aus den Bereichen Spritzgießsimulation, Strömungslehre, Wärme- und Stoffübertragung sowie Festigkeitslehre/Kontinuumsmechanik. Gleichzeitig werden industrielle Partner durch Modellierung und numerische Simulation bei der Optimierung, Konstruktion und Auslegung von hydraulischen Anlagen wie z.B. Wärmetauschern und Mischern unterstützt. Die Schwerpunkte der Arbeit liegen dabei zum einen im Bereich der Entwicklung innovativer Konzepte der Wärmeübertragung zum anderen wird aktuell ein besonderer Fokus auf die numerische Simulation von Umströmungs- und Durchströmungsvorgängen gelegt. Aufgrund der technisch hohen Relevanz der genannten Forschungsaktivitäten wurden bereits erste Ergebnisse in peer-review Fachzeitschriften veröffentlicht und Forschungsdienstleistungen für Industriepartner durchgeführt. Darüber hinaus ist Prof. Anders als Gutachter für diverse internationale Fachzeitschriften in den Bereichen Thermo- & Fluidodynamik tätig. In der Arbeitsgruppe um Prof. Denis Anders gibt es aktuell zwei zentrale Forschungsk Kooperationen im Bereich Strömungsmechanik und Wärmeübertragung. In der Kooperation mit Striko Verfahrenstechnik wurde eine Rohrmessstrecke zur experimentellen Untersuchung statischer Mischelemente hinsichtlich der auftretenden Druckverluste bei inkompressiblen Strömungen entwickelt. In der Zusammenarbeit mit Voss Automotive werden in Form einer Forschungsdienstleistung thermodynamische und strömungstechnische Auslegungskonzepte für unterschiedliche thermoelektrische Wärmetauscher-Systeme entwickelt.

Das Team des Polymer-Labors bearbeitet, unter Leitung von Prof. Simone Lake, geb. Bölinger, F&E-Projekte im Bereich der Spritzgießtechnologie. Die Schwerpunkte liegen dabei auf der Temperierung von Spritzgießwerkzeugen und der Kombinationen von bestehenden Verfahrensvarianten mit dem Ziel der Funktionsintegration, Eigenschaftsverbesserung oder Steigerung der Wirtschaftlichkeit. So wurden beispielsweise im ZIM-Projekt KF2862301MU1 die dynamische Temperierung zur Erzielung von Hochglanzoberflächen untersucht und in Kombination mit einer neuen Infrastruktur für das Spritzgießen (Temperieranlage) eine neue Produktionsstrategie unter Berücksichtigung der Energieeffizienz und Wirtschaftlichkeit erarbeitet (KF2862303SL2). Ebenfalls konnte basierend auf den Erkenntnissen des ZIM-Projektes aus Mitteln des FH-Basisprogramms eine eigene dynamische Temperieranlage für das heutige Polymer-Labor beschafft werden, die seither auch in weiteren Projekten, wie z.B. dem ZIM Projekt KF2862303SL2, zum Einsatz kam und im beantragten Forschungsprojekt zum Einsatz kommen wird. Hinsichtlich des optimierten Wärmeübergangs im Temperierkanal verfügt das Teammitglied Dr. Michael Stricker über Forschungserfahrung [SS2014], [Stri2015].

Mit dem fakultätsübergreifenden Forschungsprojekt „FunktioPol - die Polymere Lösung“ aus dem FH-Struktur-Programm, das dem Bereich „Digitales Arbeiten und Lebenswelten“ und hier insbesondere dem Profilpunkt „Gesundheit“ zugeordnet ist, konnte ein erster Grundstein für die Zusammenarbeit entlang der Prozesskette der Polymere gelegt werden. Hier ist Frau Professorin Lake im Prozessschritt der Polymerverarbeitung eingebunden. Mittelfristig ist es geplant, diese interdisziplinären und fakultätsübergreifenden Forschungsarbeiten in einen eigenen Forschungsschwerpunkt zu überführen, der dann profilbereichsübergreifende Profilt Themen abdeckt, wie z.B. „Produktion & Infrastruktur“, „Energie & Wasser“, „Umwelt & Gesundheit“ sowie „Sicherheit & Risiko“.

Frau Prof. Werner betreut Abschlussarbeiten, die Wirtschaftlichkeitsanalysen von neuen und/oder nachhaltigen Technologien in Unternehmen zum Inhalt haben. In einem Projekt in Zusammenarbeit mit einem Unternehmen in der Bauindustrie wurde z.B. untersucht, inwiefern hybridbetriebene Baumaschinen eine Alternative zu konventionellen Baumaschinen darstellen können. Dabei spielten sowohl technische Aspekte wie auch die Berechnungen der konkreten finanziellen Auswirkungen eine

Rolle. Zwei weitere Arbeiten befassten sich mit Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen bei der Einführung technischer Neuerung (Low Power Wide Area Network Technologie und fahrerlose Transportsysteme) und in Logistikunternehmen.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt OptiTemp gliedert sich in 9 Arbeitspakete, wie Abbildung 1 zeigt. Dabei besteht der fachliche Inhalt aus den Arbeitspaketen (AP) 1 bis 8, während Arbeitspaket 9 lediglich der Dokumentation des Projektes dient.

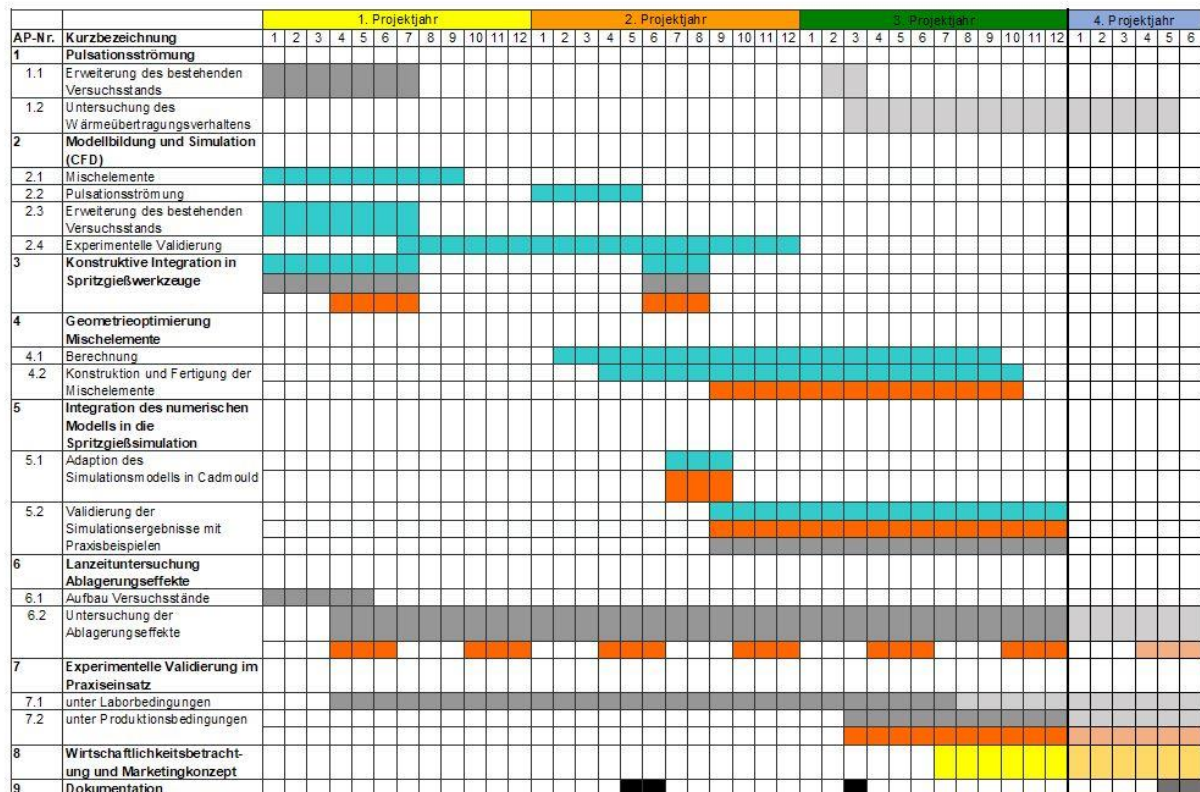


Abbildung 1: Zeitplan und Arbeitspakete des Projekts

AP 1: Pulsationsströmung

AP 1.1: Erweiterung des bestehenden Versuchsstands

Im Polymer-Labor steht ein Prüfstand zur Verfügung, um den Einfluss des Wärmeübergangs auf die Werkzeugwandtemperatur zu untersuchen. Dieser Prüfstand muss überarbeitet werden, um einen Pulsationserzeuger (wird im Projekt beschafft) in den Temperierkreislauf einzubinden.

AP 1.2: Untersuchung des Wärmeübertragungsverhaltens

Mit dem in AP 1.1 erweiterten Prüfstand soll die grundsätzliche Wirksamkeit einer Pulsationsströmung zur Verbesserung des Wärmeübertragungsverhaltens im Temperierkanal nachgewiesen werden. Darüber hinaus wird eine optimale Prozessführung der Pulsationsströmung (z.B. Frequenz, Amplitude) und deren Einfluss auf den Wärmeübergang erarbeitet. Im zweiten Projektjahr erfolgt im Meilenstein M2 die Bewertung des Ansatzes hinsichtlich seiner Eignung.

AP 2: Modellbildung und Simulation (CFD)

Die Entwicklung adäquater, numerischer Ersatzmodelle zur Erfassung der strömungsphysikalischen Vorgänge innerhalb des Temperiersystems stellt einen wesentlichen Erfolgsfaktor für das beantragte Forschungsprojekt dar. Nur durch eine zweckmäßige und systematische Abstraktion der auftretenden Strömungserscheinungen und Mechanismen der Wärmeübertragung ist es möglich ein tiefergehendes Verständnis für den untersuchten Gesamtprozess zu entwickeln.

AP 2.1: Mischelemente

In einem ersten Arbeitsschritt gilt es anhand der numerischen Betrachtung statischer Mischelemente Ansätze zur gezielten Strömungsbeeinflussung abzuleiten. Hierbei sind gleichzeitig geeignete Strategien des Modellaufbaus (Netzgenerierung, Geometrieimport und -aufbereitung) zu erarbeiten, um möglichst effizient Geometrievariationen mit anschließender Konturoptimierung der statischen Mischelemente durchführen zu können. Für derartige Berechnungen stehen der Arbeitsgruppe um Prof. Denis Anders neben der kommerziellen CFD-Software ANSYS CFX, das freie Simulationssoftwarepaket OpenFOAM sowie die Software Matlab zur mathematischen Modellbildung zur Verfügung. Für die Simulation des eigentlichen Spritzgießprozesses (Füllsimulation, Verzugsanalyse, etc.) arbeitet die Arbeitsgruppe mit der Software Cadmould des Projektpartners Simcon.

AP 2.2: Pulsationsströmung

Sobald ein geeignetes Grundmodell erstellt worden ist, müssen Elemente der Pulsationsströmung implementiert und untersucht werden. Hierzu werden in Abhängigkeit der im Experiment verwendeten Pumpenkennlinien instationäre periodische Randbedingungen aufgeprägt. Durch die Beaufschlagung der Strömungssimulation mit Partikeln lassen sich Ablagerungseffekte und die Wirkung einer Pulsationsströmung auf solche im Detail analysieren.

AP 2.3: Erweiterung des bestehenden Versuchsstands

Zur Validierung der numerischen Berechnungen und der Ermittlung wichtiger Kenngrößen der konvektiven Wärmeübertragung kann die bestehende Rohrmessstrecke des Labors für Strömungslehre (Prof. Anders) genutzt werden. Hierzu muss der Versuchsaufbau um ein LIF-System (Laserinduzierte Fluoreszenz) erweitert werden, um die Temperaturverteilung im Strömungsmedium und den Wärmeübergang zu quantifizieren. Im Speziellen werden hydraulische Druckverluste, Nusseltkorrelationen sowie Ablagerungsbereiche identifiziert und untersucht.

AP 2.4: Experimentelle Validierung

Sobald der Versuchsstand durch die genannte Messtechnik erweitert worden ist, kann die experimentelle Validierung der numerisch entwickelten Ansätze und Modelle erfolgen.

Einzelne Aspekte der angeführten Arbeitspakete lassen sich sehr gut in innovative Lehrkonzepte zum forschenden Lehren und Lernen einarbeiten. So lassen sich kleinere Teilaufgaben unter einer entsprechenden Anleitung bzw. Betreuung durch studentische Projekt- und Abschlussarbeiten in den Modulen Spritzgießsimulation und CFD bearbeiten. Auf diese Weise werden Studierende bereits in einer frühen Studienphase an aktuelle Forschungsthemen herangeführt.

AP 3: Konstruktive Integration in Spritzgießwerkzeuge

Für die Integration der Mischelemente in Spritzgießwerkzeuge müssen geeignete konstruktive Lösungen entwickelt werden. Die Mischelemente müssen dabei eine definierte Position im Temperiersystem einnehmen sowie leicht zu montieren sein. In Abstimmung mit den Anforderungen aus dem Praxiseinsatz gilt es ein intelligentes Montage- und Wartungskonzept zu berücksichtigen. Außerdem sollte die konstruktive Lösung so ausgeführt sein, dass an vorhandenen Spritzgießwerkzeugen keine Modifikationen notwendig sind. So wird die Hürde für den Einsatz der statischen Mischelemente in vorhandenen Spritzgießwerkzeugen geringgehalten.

AP 4: Geometrieoptimierung Mischelemente

Auf Grundlage der numerischen Simulation wird ein optimaler Betriebspunkt zwischen den induzierten hydraulischen Druckverlusten auf der einen und der verbesserten Durchmischung (gesteigerter Wärmeübergang) auf der anderen Seite angestrebt. Aus dieser Betrachtung ergeben sich Empfehlungen für die geometrische Ausgestaltung der Mischelemente.

AP 4.2: Konstruktion und Fertigung der Mischelemente

Die Konstruktion und Fertigung dieser neuartigen Mischelemente wird in enger Zusammenarbeit mit dem Projektpartner Striko durchgeführt. In diesem Zusammenhang sollen vor allem additive Fertigungsverfahren wie z.B. 3D-Druck zur Herstellung von Geometrien, die auf konventionellem Wege nur schwer bzw. nicht zu fertigen sind, berücksichtigt werden.

AP 5: Integration des numerischen Modells in die Spritzgießsimulation

AP 5.1: Adaption des Simulationsmodells in Cadmould

In diesem AP sollen zuerst die Ergebnisse aus den vorherigen Untersuchungen für die Temperierungsberechnung gemeinsam mit dem Projektpartner Simcon in dessen Software implementiert werden. Ein weiterer Fokus liegt nun auf der Untersuchung des eigentlichen Spritzgießprozesses hinsichtlich der Füllberechnung (Lage von Bindenähten, Schließkraftberechnung, etc.) sowie der Schwindungs- und Verzugsanalyse. Hierzu werden an ausgewählten Beispielen die Berechnungen in Cadmould mit entsprechenden Simulationen in ANSYS CFX verglichen.

AP 5.2: Validierung der Simulationsergebnisse mit Praxisbeispielen

Die Simulationsergebnisse unter Verwendung der neuen Berechnungsmodelle aus AP 2 werden in Praxisversuchen validiert. Dafür wird der Projektpartner Simcon Spritzgießwerkzeuge des Projektpartners Jokey und der TH Köln mit der adaptierten Software simulieren. Die Ergebnisse werden in Spritzgießversuchen beim Projektpartner Jokey und an der TH Köln validiert. Neben eigenen Validierungsversuchen übernimmt die TH Köln die Koordination des Arbeitspakets und begleitet die Arbeiten bei den Projektpartnern Jokey und Simcon durch Versuchsplanung und -auswertung, zum Teil auch die Versuchsdurchführung (Spritzgießversuche in Zusammenarbeit mit Jokey Maschinenbedienpersonal). Die Validierung erfolgt dabei von wissenschaftlichen MitarbeiterInnen, sowie in Abschluss- und Projektarbeiten von Studierenden. Darüber hinaus soll dieses Arbeitspaket in das Wahlfach Spritzgießsimulation im Studiengang „Allgemeiner Maschinenbau“ eingebunden werden.

AP 6: Langzeituntersuchung Ablagerungseffekte

AP 6.1: Aufbau der Versuchsstände

In diesem Arbeitspaket werden mehrere Versuchsstände, bzw. ein Versuchsstand konzipiert, konstruiert und aufgebaut, welcher es ermöglicht gleichzeitig, mehrere statische Mischelemente unter verschiedenen Prozessbedingungen hinsichtlich ihres Einflusses auf Ablagerungen im Temperierkanal zu untersuchen.

AP 6.2: Untersuchung der Ablagerungseffekte

Beim Projektpartner Jokey wird zunächst eine Bestandsaufnahme hinsichtlich der Ablagerungen in Temperierkanälen durchgeführt. Dafür werden Temperierkanäle in ausgewählten Spritzgießwerkzeugen wiederholt untersucht. Mit dem Versuchsstand aus AP 6.1 soll der Einfluss von statischen Mischelementen und einer Pulsationsströmung auf das Ablagerungsverhalten im Temperierkanal untersucht werden. Dabei soll sowohl die Geometrie der Mischelemente, als auch die Prozessführung der Pulsationsströmung sowie die Wasserqualität untersucht werden. Da sich die Ablagerungen langsam aufbauen, ziehen sich die experimentellen Untersuchungen über einen langen Zeitraum. Im zweiten Projektjahr wird im Meilenstein M2 bewertet, ob die Ablagerungen bei der Verwendung von Mischelementen kritisch für den Projekterfolg sind.

AP 7: Experimentelle Validierung im Praxiseinsatz

AP 7.1: unter Laborbedingungen

In diesem AP sollen die, in den AP 1, 3 und 4 erarbeiteten, Optimierungskonzepte unter Laborbedingungen im Spritzgießprozess getestet werden. Dies geschieht laufend, wenn neue Erkenntnisse aus Versuchsreihen an den Prüfständen (Pulsationsströmung, Ablagerungen), bzw wenn statische Mischelemente mit optimierten Geometrien vorliegen. Dafür und für die Nutzung in AP 5.2 müssen für ein Stammwerkzeug der TH Formeinsätze konzipiert, konstruiert und gefertigt werden, welche für die Untersuchungen eine geeignete Formteilgeometrie aufweisen und über die notwendige Sensorik verfügen. Mit einer Wärmebildkamera soll die Effizienz der Optimierungskonzepte bewertet und die Eignung von statischen Mischelementen für die verbesserte Temperierung von einzelnen Werkzeugbereichen (Hot-Spots) untersucht werden. Die Wärmebildkamera kommt ebenfalls in AP 7.2, sowie AP 1.2 und 2.4 zum Einsatz.

AP 7.2: unter Produktionsbedingungen

Die in den AP 1.2, AP 4 und AP 7.1 als geeignet bewerteten Optimierungsmaßnahmen sollen beim Projektpartner Jokey unter Produktionsbedingungen getestet werden. Dafür stellt der Projektpartner Jokey die Maschinen- und Werkzeugtechnik sowie Personal für die Maschinenbedienung zur Verfügung. Die Versuchskonzeption, -begleitung und -auswertung führt die TH Köln durch. Die Arbeiten der TH Köln werden von wissenschaftlichen MitarbeiterInnen sowie in Abschluss- und Projektarbeiten von Studierenden beim Projektpartner Jokey durchgeführt. Die Lehrveranstaltung „Werkzeuge in der Kunststoffverarbeitung“ kann, z. B. im Rahmen einer Exkursion, in dieses Arbeitspaket eingebunden werden.

AP 8: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und Marketingkonzept

Das Ziel dieses AP ist die wirtschaftliche Vorteilhaftigkeit der in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern erarbeiteten Optimierungskonzepte (AP 7.2) zu berechnen. Dabei kommen

verschiedene statische und dynamische Investitionsrechenverfahren in Betracht (zu Investitionsrechenverfahren [Pape2015]). Eine statische Kostenvergleichsrechnung soll zunächst die Kosteneinsparungen des optimierten Verfahrens hinsichtlich der reduzierten Zykluszeit, der geringen Betriebskosten, der Energieeinsparungen und der reduzierten Wartungs- und Reinigungskosten quantifizieren. Ergänzend bieten sich dann die Berechnung dynamischer Verfahren wie die Kapitalwertmethode, die interne Zinsfußmethode und die dynamische Amortisationszeit an, da hier über den Einbezug eines kalkulatorischen Kalkulationszinses die Finanzierungskosten der Unternehmen berücksichtigt werden. Diese Verfahren sind um Sensitivitätsanalysen zu erweitern, die darüber Auskunft geben, wie sich die relevanten Parameter ändern können, ohne die Wirtschaftlichkeit des Projekts zu gefährden [BD2017]. Die Berechnungen werden auch in der Lehrveranstaltung Finanzierung und Investition (Projektarbeiten) vorgenommen.

Sobald die Optimierungspotenziale (AP7.2) als wirtschaftlich sinnvoll eingestuft werden, soll ein Marketingkonzept erarbeitet werden, welches die Vermarktung der neuen Technologie zum Inhalt hat. Es soll in einer Marktstudie zunächst das Marktpotenzial abgeschätzt werden. Anschließend soll eine Markteintrittsstrategie erarbeitet werden, die neben den 4P des Marketingmix (product, place, price, promotion) auch in einer SWOT Analyse externe Faktoren wie Risiken und Chancen den Stärken und Schwächen der neuen Technologie gegenübergestellt wird. Ergänzend bietet sich in diesem Bereich auch eine Abschlussarbeit an.

AP 9: Dokumentation

In diesem Arbeitspaket werden die Projektarbeiten dokumentiert und die Projektberichte erstellt.

1.4 Wissenschaftliche und technische Ausgangssituation

Erste Erkenntnisse zu erzielbaren Effekten mit den vorgeschlagenen Optimierungsansätzen liegen im Stand der Technik vor. Bei den statischen Mischelementen beschränken sich die Erkenntnisse jedoch auf einen grundsätzlichen Machbarkeitsnachweis mittels eines stationären Versuchsstands. Erkenntnisse über die Praxistauglichkeit im Spritzgießprozess z.B. hinsichtlich Ablagerungen im Temperierkanal liegen nicht vor. Außerdem ist unbekannt, ob sich mit stationären Mischelementen noch stärkere Effekte erzielen lassen, da keine Arbeiten existieren welche optimierte Geometrien der statischen Mischelemente vorschlagen. Hinsichtlich der Pulsationsströmung liegen keine Erkenntnisse über erzielbare Effekte im Spritzgießprozess vor. Die Praxistauglichkeit ist nicht nachgewiesen, da unklar ist, welche Anforderungen an einen Pulsationserzeuger gestellt werden und zu welchen Kosten ein solcher hergestellt werden kann. Für die Verwendung von statischen Mischelementen und der Pulsationsströmung liegen keine numerischen oder analytischen Berechnungsmodelle vor, um den Effekt auf die Wärmeübertragung und den Druckbedarf bei der thermischen und strömungstechnischen Auslegung von Temperiersystemen in Spritzgießwerkzeugen zu berücksichtigen. Diese Fragen sind Kern des beantragten Forschungsprojekts.

Die Attraktivität des Lösungsansatzes zur Optimierung der energieeffizienten Wärmeübertragung in Spritzgießwerkzeugen beruht erstens auf dem einfachen und kostengünstigen Einsatz von statischen Mischelementen in Verbindung mit dem deutlichem Potenzial zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit. Der zweite Attraktivitätsfaktor ist das Potenzial der Pulsationsströmung für weitere Effizienzsteigerungen im Wärmeübertragungsverhalten bei gleichzeitigen Vorteilen bezüglich des Ablagerungsverhaltens im Temperierkanal. Eine Aufbereitung des Temperiermediums mit

Chemikalien (z.B. Korrosionsschutz oder Biozid) kann somit entfallen, was die Wirtschaftlichkeit und die Energieeffizienz weiter steigert und Umweltbelastungen minimiert.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Projekt OptiTemp wurde zu Beginn eine Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Stellen geplant. Dazu haben sich die folgenden Partner gefunden.

Jokey Holding GmbH & Co. KG

Der Schwerpunkt von Jokey liegt auf der Verarbeitung von thermoplastischen Kunststoffen im Spritzgießverfahren. Jokey hat in über 50 Jahren Kompetenz im Bereich der Entwicklung komplexer Spritzgießverfahren aufgebaut.

Simcon kunststofftechnische Software GmbH

Simcon hat in über 25 Jahren eine Vielzahl von numerischen Modellen in Ihre Software implementiert und weiterentwickelt (z.B. Varimos). Darüber hinaus bietet Simcon die Durchführung von Spritzgießsimulationen und numerischen Prozesssimulationen als Dienstleistung an. Im Rahmen der Förderinitiative „Photonische Prozessketten“ mit dem Projekt „Flexible und ressourceneffiziente Herstellung von Hochleistungsoptiken aus Kunststoff durch integrierte Fertigung von Mehrkomponentensystemen (OptiSys)“ (13N13579) hat Simcon bereits Forschungsexpertise im Bereich der Temperierung aufgebaut.

STRIKO Verfahrenstechnik GmbH

Striko konnte in über 50 Jahren Kompetenzen für die Entwicklung und Fertigung von verfahrenstechnischen Komponenten, insbesondere statische Mischelemente aufbauen.

2. Eingehende Darstellung

2.1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

Die Inhalte und Ergebnisse des Projektes sind im Nachfolgenden zugehörig zu den jeweiligen Arbeitspaketen aufgeführt.

AP 1: Pulsationsströmung

Für das AP1 „Pulsationsströmung“ wurde das in Abbildung 2 dargestellte schematische Konzept erarbeitet.

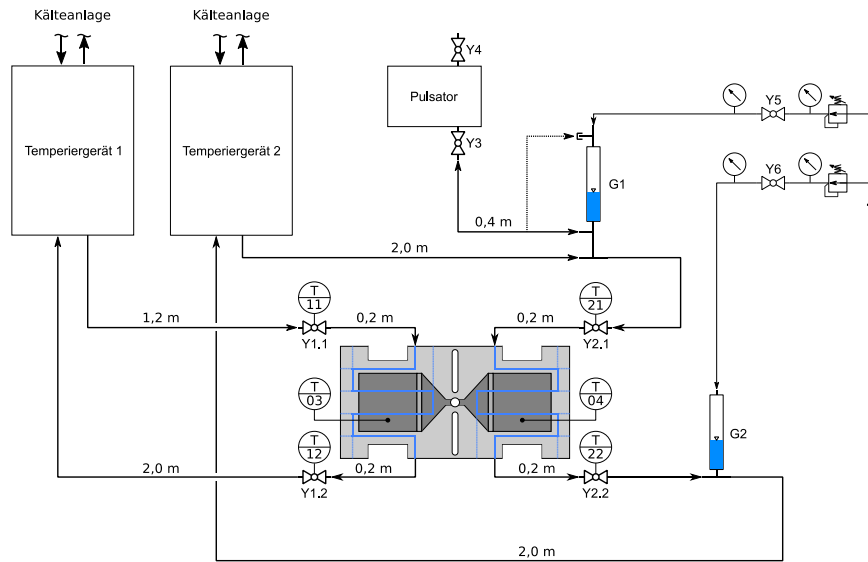


Abbildung 2: Schematisches Konzept für den Pulsationsvorversuch

Grundgedanke der realisierten Pulsation ist es, die Flüssigkeit im Wärmeüberträger in eine Pulsation bzw. Schwingung nahe der Eigenfrequenz des Fluidsystems zu versetzen. In Anlehnung an [Tur+2004, NN2004] werden dazu am Ein- und Austritt des Wärmeüberträgers (in unserem Fall das temperierte Spritzgießwerkzeug) jeweils Pulsationsgefäße (G1 und G2) installiert, die ein Gaspolster (im Versuchsaufbau Luft) beinhalten und eine pulsierend periodische Flüssigkeitsbewegung zwischen dem Gaspolstern ermöglichen. Durch die Kopplung der Flüssigkeitspulsation im Wärmeüberträger mit der Gasschwingung in den Pulsationsgefäßen entsteht ein schwingfähiges System. Als Wärmeträger wird Wasser genutzt, das mit einem handelsüblichen Temperiergerät auf die gewünschte Temperatur gebracht und gefördert werden kann. Die Anordnung des pulsierenden Medienstroms erfolgt so, dass das zu durchfließende Spritzgießwerkzeug zwischen den Pulsationsgefäßen angebunden ist. Für den Versuchsaufbau wird nur eine Werkzeughälfte bzw. eine Formplatte genutzt, wobei als Versuchsgeometrie eine mit der Norm DIN EN ISO 294-3:2003 (D); Typ D2 konforme Probeplatte (mit thermischer Trennung zwischen den beiden Platten) genutzt wird (siehe auch AP3). Der Wärmeeintrag durch die Schmelze wird über eine Heizplatte (nicht in der Abbildung 2 dargestellt) simuliert. Als Referenz wird eine Kavität zur Wärmeabfuhr mit standardmäßiger Flüssigtemperierung (Temperiergerät 1) betrieben. Eine große Herausforderung stellt die Anregung der Pulsation, der eigentliche Pulsator dar, da dieser erst im Rahmen des Forschungsvorhabens ausgelegt und entwickelt werden musste. In ersten Versuchen zur Vorbereitung der Auslegung des Pulsators konnte die generelle Machbarkeit mit Hilfe einer improvisierten Pulsationserzeugung gezeigt werden. Hierzu wurde eine Kolbenmembranpumpe, die leihweise für die Versuche zur Verfügung stand, genutzt, wobei der Förderbetrieb durch eine Modifikation der Ventile unterbunden wurde. Die Frequenz des

Kolbenhubes konnte über Frequenzumrichter variiert werden. In der Abbildung 3 ist der realisierte Versuchsaufbau für die ersten Versuche zu sehen.

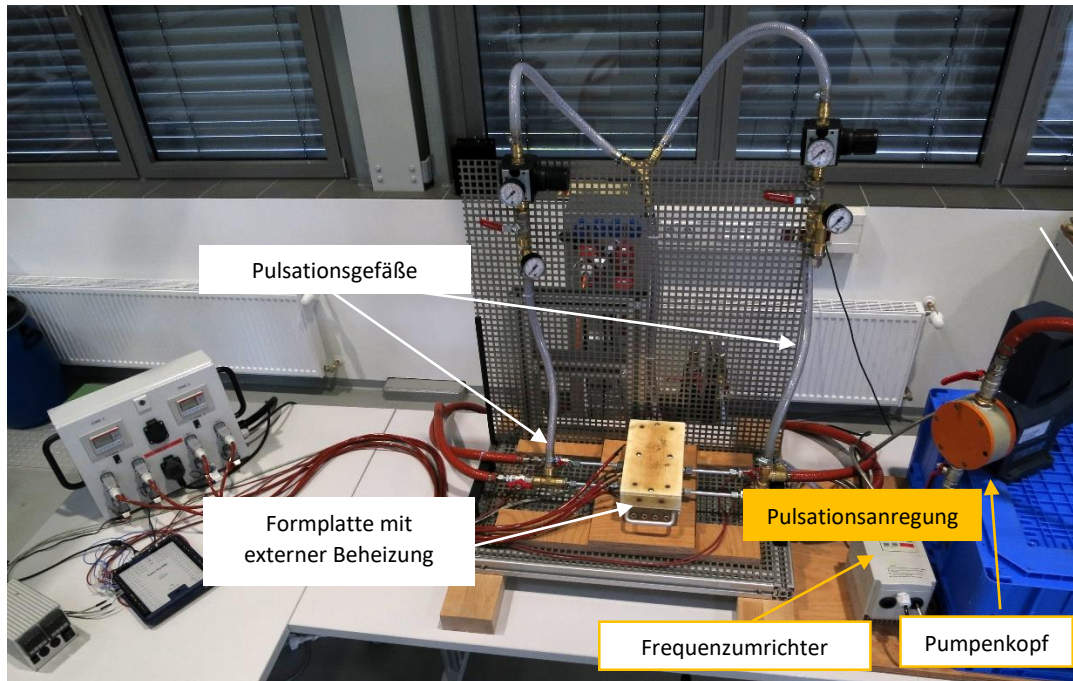


Abbildung 3: Erster Versuchsaufbau zur Pulsationsströmung

Die benötigte Schwingung der Eigenfrequenz konnte jedoch mit den ersten Versuchen nicht realisiert werden. Schwerpunkt des AP1 lag daher in der Auslegung und Konzeptionierung des Pulsationserzeugers und in der Optimierung des Versuchstands. Für die Pulsationserzeugung wurden zwei grundlegend unterschiedliche Konzepte erarbeitet (siehe Abbildung 4).

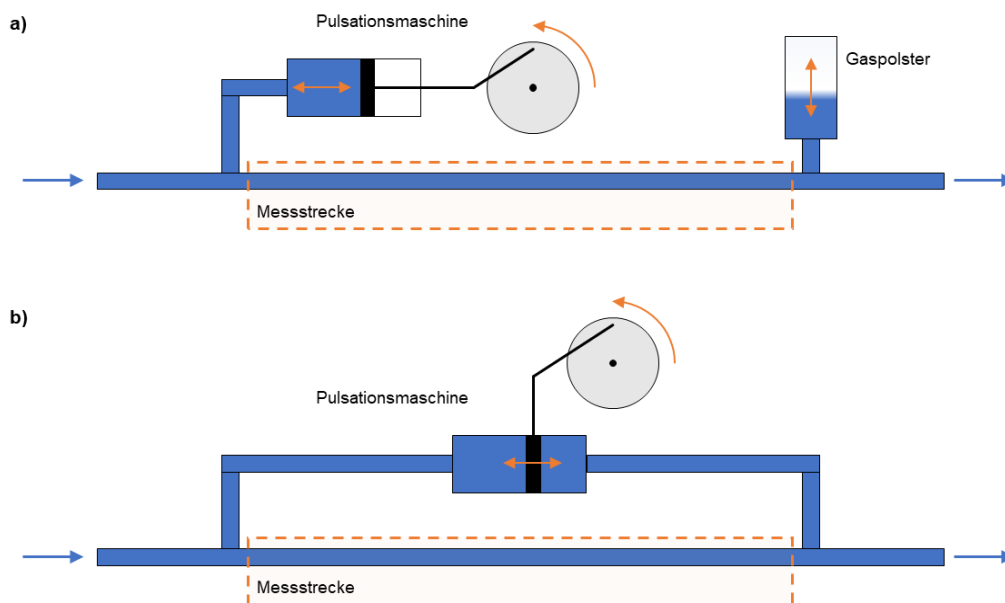


Abbildung 4: Konzepte zur Umsetzung der Pulsationstechnik. a) Grundkonzept zum Induzieren einer Pulsation in eine durchströmte Messstrecke. b) Weiterentwickeltes Konzept.

Konzept a) in Abbildung 4 zeigt einen einseitig-wirkender Pulsationserzeuger, der die Pulsationsschwingungen einseitig in die Messstrecke (Temperierkanal des Spritzgießwerkzeugs) induziert und an die Grundgedanken in Abbildung 2 angelehnt ist. In Konzept b) hingegen kann das „Gas/Luftpolster“ entfallen und ein doppelseitig-wirkender Pulsationserzeuger (Tandem-Pulsator) ist mit Ein- und Ausgang der Messstrecke verbunden. Dieser Aufbau bietet den energetischen Vorteil, dass lediglich Druckunterschiede zwischen dem Ein- und Auslauf der Messstrecke und Reibungsverluste überwunden werden müssen. Im einseitigen Aufbau hingegen muss zudem gegen den Systemdruck am Einlauf „gearbeitet“ werden. Nachteilig beim doppelseitig-wirkenden Aufbau ist die erschwerte konstruktive Ausführung, vor allem hinsichtlich der Dichtigkeit. Im Rahmen des Projektes wurde ein Tandem -Pulsator konzipiert und beschafft, der durch Umbaumaßnahmen auch im einseitigen Betrieb genutzt und in beiden Betriebsarten mit Gas/Luftpolstern betrieben werden kann.

Für die Auslegung des Pulsators wurde als Grundlage für die Beschaffung die erforderliche Pulsationsfrequenz anhand (Gl. 1 abgeschätzt [Hus2004].

$$f_R \approx \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{p_{\text{Luftpolster}} + \rho_{\text{Fluid}} g h_{\text{Fluid}}}{\rho_{\text{Fluid}} h_{\text{Fluid}} \frac{V_{\text{Luftpolster}}}{A_{\text{Kanal}}}}} \quad (\text{Gl. 1}) [\text{Hus2004}]$$

In (Gl. 1 enthalten ist der Druck im Luftpolster $p_{\text{Luftpolster}}$ mit 1 bi 2 bar, Dichte von Wasser ρ_{Fluid} mit 998,21 kg/m³, Höhe der Fluidsäule h_{Fluid} mit 1200 mm, Volumen des Luftpolsters $V_{\text{Luftpolster}}$ mit 51200 mm³ und der Querschnitt des Kanals A_{Kanal} mit 50,27 mm². Auf Grundlage dessen wurde der Pulsator mit einem Frequenzbereich von 0,5 bis 8 Hz ausgelegt.

Neben der Konzeptionierung und Auslegung war ein weiterer Schwerpunkt des AP die Erarbeitung optimaler Einstellparameter für die reproduzierbare Erzeugung einer Pulsationsströmung. Um Start und Ausprägung der Pulsation besser beobachten und auswerten zu können, wurde der Versuchsstand aus Abbildung 3 weiter optimiert und ein Teil der Temperierschläuche durch transparente Rohre ersetzt (siehe Abbildung 5)

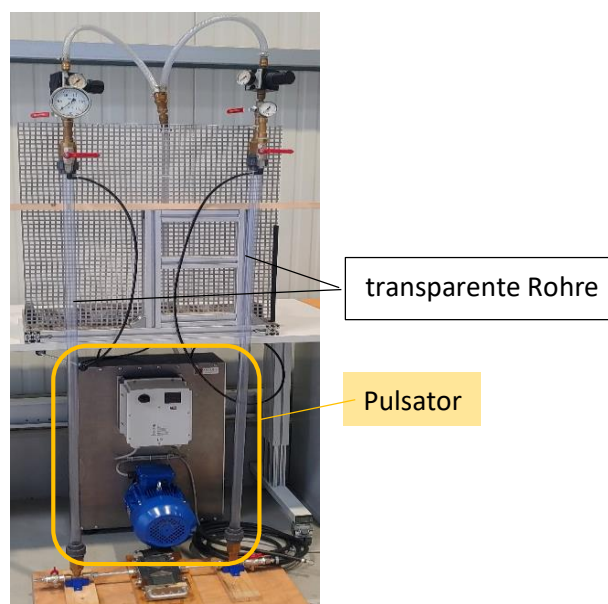


Abbildung 5: optimierter Pulsationsversuchsstand

Nach dem Aufbau des Versuchsstands wurde die tatsächliche Eigenfrequenz des Schwingungssystems durch Auslenkversuche ermittelt. Die Versuche orientieren sich an den in den Literaturangaben ermittelten Pulsationsfrequenzen. Diese bestätigen die numerisch berechneten Ergebnisse des AP2 zur Pulsationsströmung. Die ermittelten Abweichungen liegen überwiegend im Bereich der Messungenauigkeit der Temperaturmessung. Obwohl der gewünschte Effekt der Pulsationsströmung zur Optimierung des Wärmeübergangs bei den ausgewählten Frequenzen nicht signifikant ist, könnte ein neuer Messbereich bei der Eigenfrequenz von 0,04 Hz definiert werden. Leider ist dieser Messbereich aufgrund der begrenzten Leistung des vorhandenen Pulsators innerhalb des Berichtszeitraums aus zeit- und kostengründen nicht realisierbar.

AP 2: Modellbildung und Simulation (CFD)

Im übergeordneten AP 2 „**Modellbildung und Simulation (CFD)**“ wurden im Berichtszeitraum zahlreiche vielversprechende Ergebnisse erzielt. Auf der einen Seite wurde ein konsistentes CFD-Modell für numerische Füllstudien in der kommerziellen CFD-Software ANSYS CFX aufgebaut und mit verschiedenen Untersuchungen in Cadmould 3D-F abschließend validiert. Bei dünnwandigen Füllgeometrien, die charakteristisch für typische Spritzgießbauteile sind, liegt eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den Berechnungen vor. Bei dickwandigen Strukturen kommt es jedoch zu größeren Abweichungen, weil die in Cadmould 3D-F verwendete Hele-Shaw-Approximation der Navier-Stokes-Gleichungen aufgrund des zunehmenden Dickeneinflusses nicht mehr gültig ist. Ein besonderes Augenmerk lag bei der Modellierung auf dem nicht-Newtonschen Verhalten der Polymerschmelze, um Effekte der Schwererwärmung sowie des Wärmeüberganges im Formnest korrekt abzubilden. Die dabei erzielten Ergebnisse wurden auf dem 14th World Congress on Computational Mechanics (WCCM) im Januar 2021 vorgestellt und im zugehörigen Konferenzband veröffentlicht. Am 8. März 2021 wurde ein Fachvortrag auf der KomPlasTech 2021 zur numerischen Füllsimulation beim Spritzgießen gehalten. Der im Rahmen dieser Konferenz eingereichte Artikel befindet sich noch im peer-review Begutachtungsprozess der Zeitschrift *COMPUTER METHODS IN MATERIALS SCIENCE*. Der Umbau des laboreigenen Versuchsstands (Rohrstrecke) zur Untersuchung des Wärmeübergangs inkompressibler Rohrströmungen ist weitestgehend abgeschlossen. Die Rohrstrecke wurde um eine Heizquelle in Form eines Heizbandes sowie entsprechender Sensorik erweitert, siehe Abbildung 6. Auf diese Weise konnte die Randbedingung eines nahezu konstanten Wärmestromes praktisch umgesetzt werden.



Abbildung 6: Umgebaute Rohrstrecke mit Messingrohr, Thermoelementen, digitalen Differenzdruckmesssystemen, Datenlogger und geregelter Heizquelle.

Der schematische Aufbau der Rohrmessstrecke ist in Abbildung 7 dargestellt.

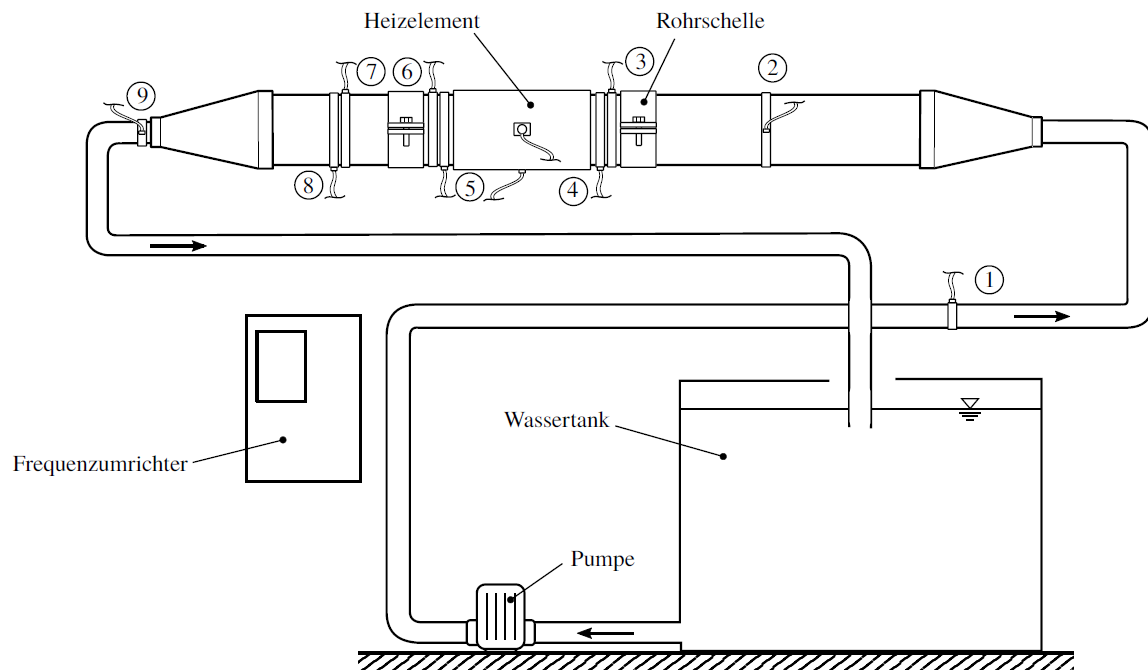


Abbildung 7: Schematischer Aufbau (nicht maßstabsgetreu) mit nummerierten Sensorpositionen.

Mehrere studentische Projekte zur Charakterisierung des Einflusses statischer Mischer auf den Wärmeübergang wurden an der entwickelten Rohrstrecke durchgeführt. Im Rahmen der Untersuchungen hat sich gezeigt, dass der Einsatz statischer Mischer durch die zusätzlich induzierten Wirbelstrukturen zu einer erheblichen Intensivierung des Wärmeübergangs im betrachteten Reynoldszahlenbereich von 1.900 bis 20.000 führt. Für die laminare Strömung sowie im Übergangsbereich konnte ein dominanter Effekt der natürlichen Konvektion infolge des eingeleiteten Wärmestroms an der Rohrwand beobachtet werden. Das warme Wasser steigt aufgrund der geringeren Dichte auf die Rohroberseite und sorgt für eine stark ausgeprägte Mischkonvektion. Hierdurch kommt es dann zu erheblichen vertikalen Temperaturgradienten in den Wandtemperaturen. Für größere Strömungsgeschwindigkeiten wird dieser Effekt jedoch von der erzwungenen Konvektion überlagert und entfaltet auf den gesamten Wärmeübergangsmechanismus nur noch einen untergeordneten Effekt.

Anschließend wurde das an der Rohrmessstrecke validierte numerische Modell auf einen idealtypischen Ausschnitt eines Spritzgusswerkzeugs übertragen (Abbildung 8). Aufgrund der besseren Vernetzungsmöglichkeiten wurde dabei das kommerzielle CFD-Programm ANSYS Fluent verwendet.

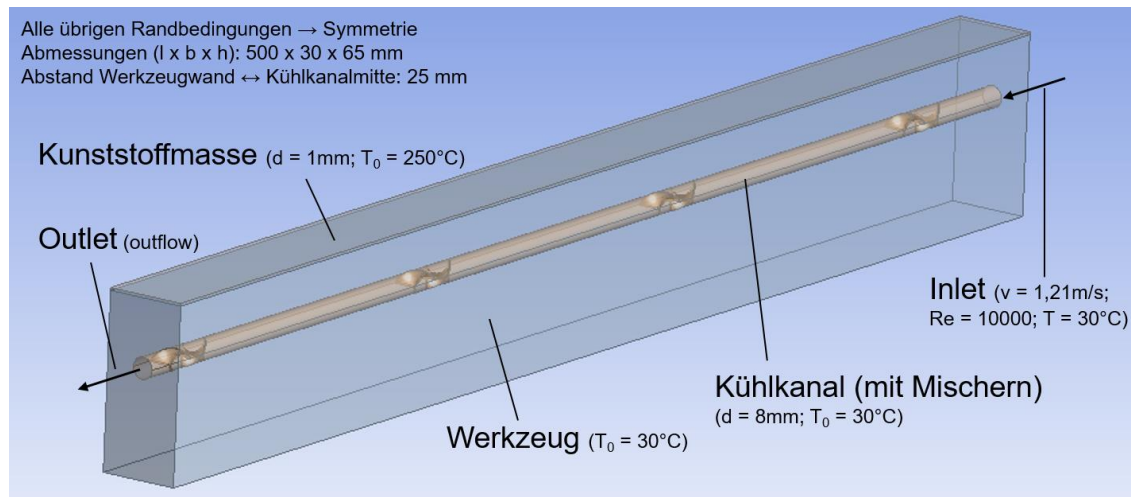


Abbildung 8: Rechenmodel - System mit Anfangs- und Randbedingungen

Um den Einfluss des Mischerabstandes auf die mittlere Werkzeugwandtemperatur sowie die maximale Temperaturdifferenz auf der Werkzeugwand zu untersuchen wurden zunächst stationäre Rechnungen mit einem konstanten Wärmestrom von 13400 W/m^2 und einer verfahrenstypischen Reynoldszahl von 10000 durchgeführt. Es zeigt sich, dass bei den gegebenen Anfangs- und Randbedingungen alle Mischerkonfigurationen (mit Ausnahme der Verwendung nur eines einzelnen Mixers) generell zu einer deutlichen Homogenisierung der Temperaturverteilung im Werkzeug (Abbildung 9) und einer Abnahme der mittleren Temperatur in der Kontaktfläche zur Schmelze führen (Größenordnung 2,5%). Die Vorteile eines komplett mit Mischern gefüllten Kühlkanals gegenüber einer äquidistant verteilten Mischeranordnung sind ab einer gewissen Mindestanzahl von Mischern sehr gering. Dies ist gerade hinsichtlich der Minimierung des mischerinduzierten Druckverlusts ein wichtiges Ergebnis.

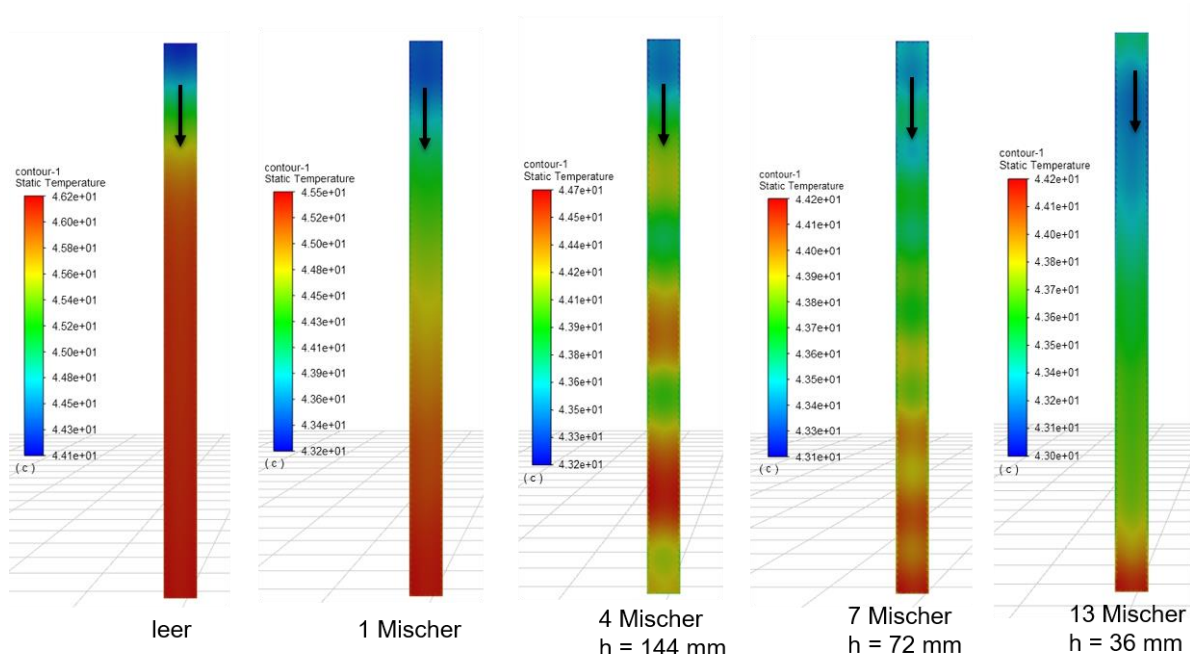


Abbildung 9: Temperaturverteilung in der Werkzeugwand (Kontaktfläche Werkzeug zu Schmelze)

In weiteren umfangreichen numerischen Untersuchungen wurden diverse Parameter der Ausgangskonfiguration variiert, so unter anderem die Durchflussgeschwindigkeit der Kühlfüssigkeit (→ Reynoldszahl), die Größe des aufgetragenen Wärmestroms (→ Dicke des Spritzgussbauteils) und die

Wärmeleitfähigkeit des Werkzeugstahls. Es ist zu erkennen, dass die Verwendung von Mischern im Bereich kleiner Reynoldszahlen deutlich größeres Verbesserungspotential hinsichtlich der mittleren Werkzeugwandtemperatur ($\approx -12\%$) aufweist als bei sehr hohen, bei denen die Rohrströmung bereits derart turbulent ist, dass zusätzliche Turbulenzen/Verwirbelungen durch die Mischer keinen nennenswerten Effekt auf die Wärmeübertragung zeigen. Ebenfalls deutlichen Einfluss haben die Wärmeleitfähigkeit des Werkzeugstahls und die eingebrachte Wärmeleistung. Je höher die Werte dieser beiden Parameter umso größer werden die Unterschiede in der Werkzeugwandtemperatur bei den untersuchten Varianten und umso vorteilhafter erscheint der Einsatz der statischen Mischer. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass der Einfluss der Mischer auf den konvektiven Wärmeübergang umso deutlicher wird, je größer die Temperaturdifferenz zwischen Werkzeugstahl und Kühlmittel ist, d.h. je langsamer der Kühlkanal durchströmt wird, je höher die eingebrachte Wärmeleistung und je größer die Wärmeleitfähigkeit des Werkzeugs ist. Grund hierfür ist, dass die durch die Mischer ausgelösten Verwirbelungen die Ausbildung einer warmen Grenzschicht im Kühlmittel am Rand des Kühlkanals verhindern. Durch die Verwirbelungen wird stetig kühleres Wasser aus der Mitte des Kühlkanals zu den Rändern transportiert, wo sich so dauerhaft ein großer Temperaturgradient etablieren kann, der zu einem optimierten Wärmeübergang in der Kontaktfläche beiträgt.

Der beschriebene Effekt konnte auch experimentell mit Hilfe der Laser induzierten Fluoreszenz (LIF) nachgewiesen werden. Nach den notwendigen Umbaumaßnahmen an der Rohrmessstrecke und Installation des LIF-Systems (Abbildung 10) wurden mit Hilfe des optischen Messverfahrens Temperaturprofile im Längsschnitt des Rohres sichtbar gemacht.

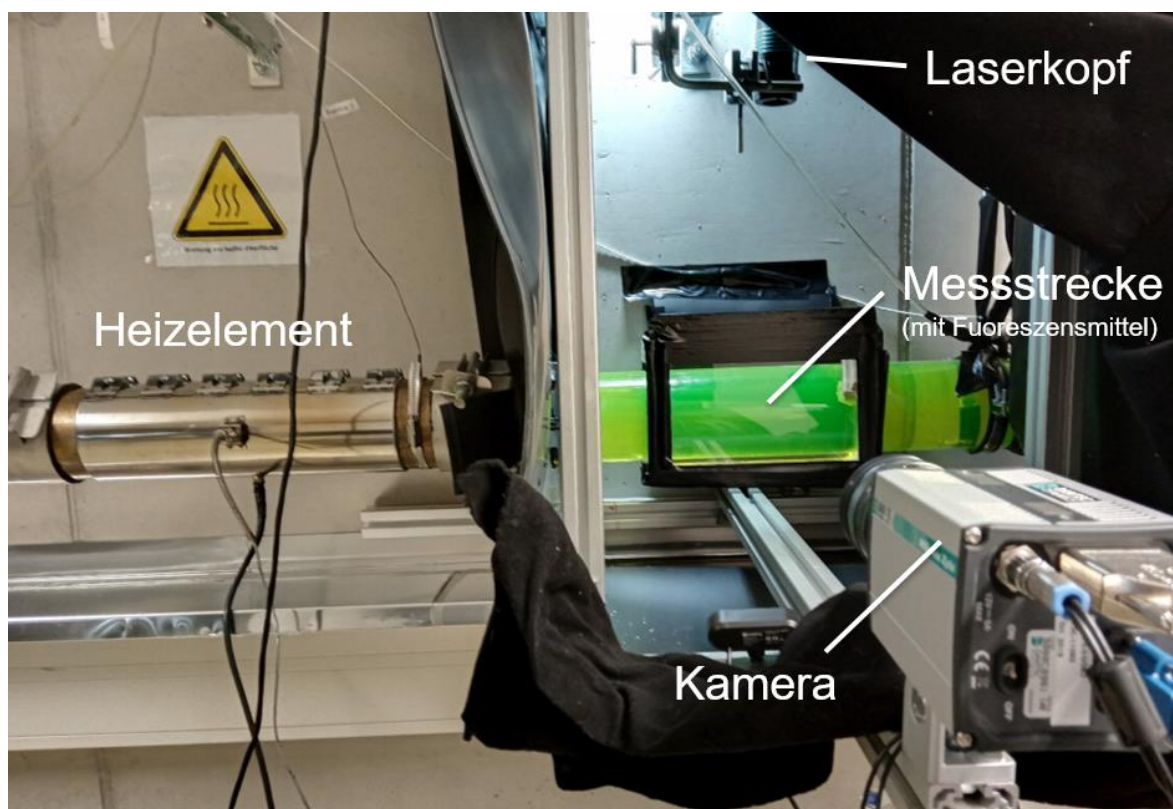


Abbildung 10: Umgebaute Rohrmessstrecke mit LIF-System (Laserkopf mit Lichtschnittoptik und Kamera)

Abbildung 11 zeigt, wie sich die Temperaturverteilung über die Höhe des Rohres bei der Verwendung eines Mischers verändert. Der bereits in früheren Messungen mit Wandtemperatursensoren beobachtete große vertikale Temperaturgradient, welcher auf der Verminderung der Dichte des warmen Wassers basiert, kann durch die mischerinduzierten Wirbelstrukturen nahezu vollständig

abgebaut werden. So kann die Entstehung einer den Wärmeübergang mindernden “warmen” Grenzschicht verhindert werden und die Temperaturverteilung wird homogenisiert.

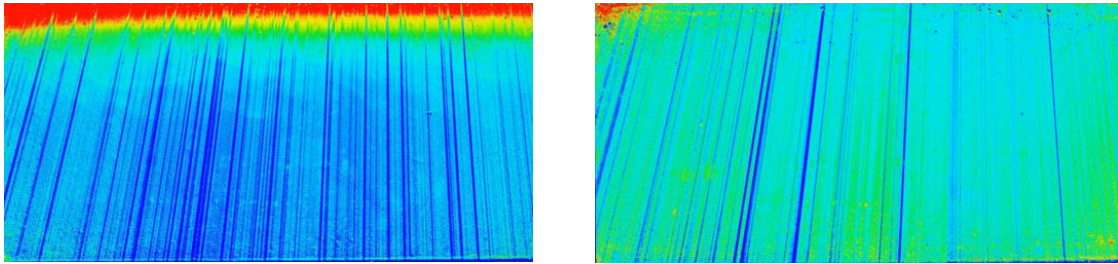
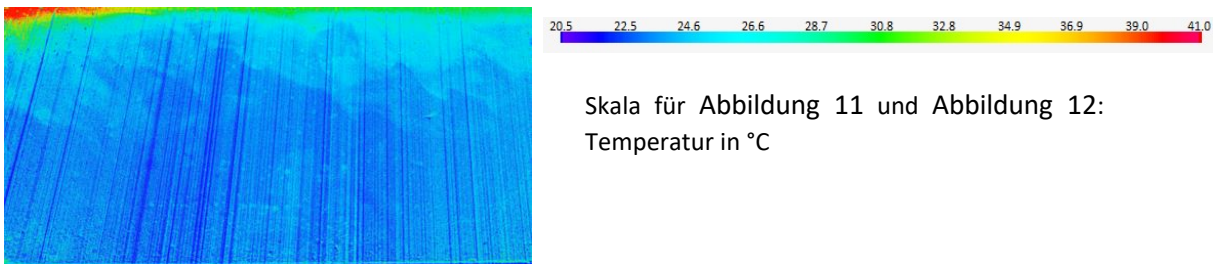


Abbildung 11: Temperaturverteilung im Rohrquerschnitt ($Re=5800$) - links: Rohr ohne Mischer, rechts: Rohr mit Mischer



Skala für Abbildung 11 und Abbildung 12:
Temperatur in °C

Abbildung 12: Temperaturverteilung im Rohrquerschnitt ($Re=9700$) - Rohr ohne Mischer

Ebenfalls in Übereinstimmung mit den früheren Messungen und den numerischen Simulationsergebnissen ist zu erkennen, dass ein ähnlicher Effekt durch eine Erhöhung der Durchflussgeschwindigkeit (Reynoldszahl) und damit des Turbulenzgrades der Rohrströmung erzielt werden kann (Abbildung 12). Die zusätzliche Verwendung von Mischern hat in diesem Fall nur noch einen untergeordneten Effekt auf die Temperaturverteilung.

Nach der Identifikation der wesentlichen Einflussfaktoren und Wirkmechanismen wurde das numerische Modell auf ein transientes Berechnungsverfahren erweitert. So ist es möglich Spritzgusszyklen abzubilden und den Einfluss der Verwendung von Mischern auch zeitlich aufgelöst zu betrachten. Wie zu erwarten, müssen dabei zunächst mehrere Zyklen durchlaufen werden, bis sich ein “eingeschwungen” Zustand einstellt, an dem eine Auswertung stattfinden kann. Abbildung 13 zeigt den Temperaturverlauf der durchschnittlichen Schmelzetemperatur über 15 Zyklen á 20 Sekunden sowie einen Ausschnitt am Ende des letzten Zyklus.

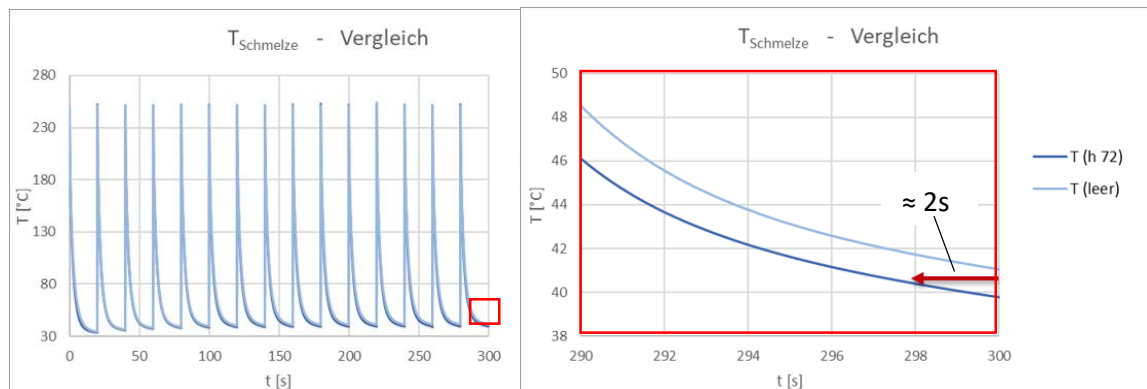


Abbildung 13: Mittlere Temperatur der Kunststoffschmelze über 15 Zyklen bei Kühlkanal mit und ohne Mischer (links) rechts: Ausschnitt am Ende des 15. Zyklus

Es fällt auf, dass die durchschnittliche Temperatur der Kunststoffschmelze am Ende des letzten Zyklus in dem hier untersuchten Model durch die Verwendung von Mischern in dem Kühlkanal nur geringfügig ($\approx 1\text{K}$) vermindert werden kann. Eine zeitliche Betrachtung der Verläufe zeigt jedoch, dass die Endtemperatur der Referenzrechnung (ohne Mischer) bei der Variante mit Mischern deutlich früher erreicht wird (Abb. 7 rechts). In der untersuchten Konfiguration ist so offenbar eine Reduktion der Zykluszeit um etwa 2 Sekunden ($\approx 10\%$) möglich, was durch weitere Berechnungen (mit dieser verkürzten Zykluszeit) bestätigt werden konnte.

Insgesamt deuten die numerischen Ergebnisse damit bislang auf deutliche wirtschaftliche Vorteile durch die Verwendung statischer Mischer hin. Um belastbare Aussagen zur Wirtschaftlichkeit treffen zu können, müssen jedoch einige weitere Einflussfaktoren, insbesondere der Mischer bedingte Druckverlust sowie die Pumpenkennlinie, berücksichtigt werden.

Zur Erfassung dieser Faktoren wurden zunächst die Rohrnetzkenlinien der einzelnen Kühlkanalvarianten (mit und ohne Mischer) bestimmt und über (idealisiert gewählte) Pumpenkennlinien die entsprechenden Arbeitspunkte bestimmt (Abbildung 14).

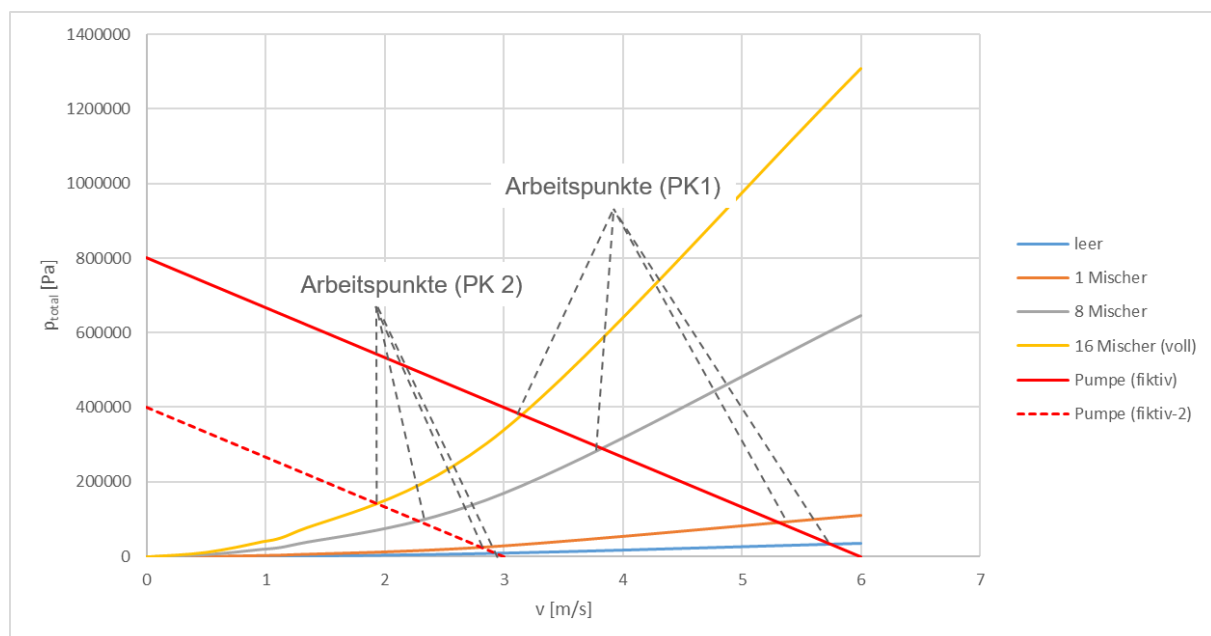


Abbildung 14: Berechnung der verschiedenen Arbeitspunkte als Schnittpunkt von Rohrnetz- und Pumpenkennlinie

Mit Hilfe dieser Arbeitspunkte wurden die Eingangsdaten (Fließgeschwindigkeit und Druck) für die Berechnungen der jeweiligen Varianten angepasst. Im Vergleich zu den bisherigen Ergebnissen (bei denen die gleiche Fließgeschwindigkeit für alle Konfigurationen verwendet wurde) zeigen sich nun, geringere Vorteile der Mischervarianten gegenüber dem leeren Kühlkanal.

Anschließend wurden begleitend zu weiterführenden Untersuchungen des Parameterraums die bisherigen numerischen Rechenmodelle für den Kühlkanal erweitert und die Ergebnisse mit analytischen Lösungen abgeglichen. Ferner wurden detaillierte Vergleiche zwischen stationärer und transienter Betrachtung des Kühlprozesses durchgeführt.

Vergleich stationäre vs. transiente Berechnungsmethodik

Das Ausschnittsmodell des Spritzgusswerkzeugs, welches mit Helical Mischern in definierten Abständen ausgestattet ist (Abbildung 15), umfasst eine 1mm dicke Schmelzeschicht, welche zu Beginn

eines jeden Spritzgusszyklus eine Temperatur von 250 °C zugewiesen wird, die über die Zykluszeit von 20 s infolge der Werkzeugkühlung abnimmt. Um das Gesamtsystem in einen “eingeschwungenen” (quasi-stationären) Zustand zu bringen ist es, für diese Konfiguration, mit den gegebenen Materialparametern (Tabelle 1), erforderlich, mindestens 15 Spritzgusszyklen zu betrachten – zuvor dominieren Einflüsse des zunächst noch kalten Spritzgusswerkzeugs. Um Berechnungszeit zu sparen und möglichst viele Varianten untersuchen zu können, wurde das transiente Berechnungsmodell in einen stationäres Modell überführt. Die Schmelzeschicht wurde dabei durch eine äquivalente, konstante Wärmestromdichte ersetzt. Diese errechnet sich gemäß der folgenden Gleichung und ergibt sich aus der Anwendung des 1. Hauptsatzes der Thermodynamik kombiniert mit der Methodik der Blockkapazität.

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A} = \frac{c_{p,melt} V_{melt} \rho_{melt} \Delta T_{cooling}}{t_{cooling} A_{melt}}$$

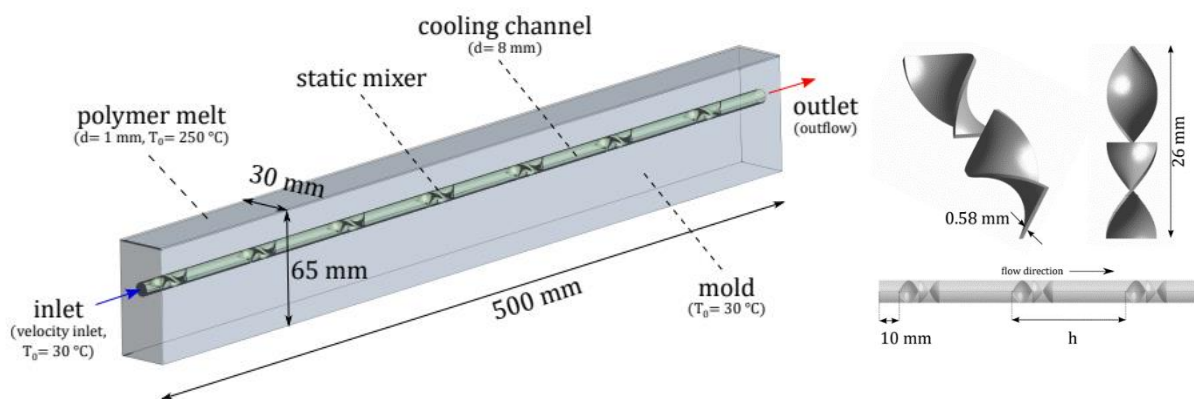


Abbildung 15: Berechnungsmodell mit Anfangs- und Randbedingungen (l.) – Mischergeometrie und Anordnung (r.)

	Steel (solid)	Polymer (solid)	water liquid (fluid)
ρ	7800 kg/m ³	777.6 kg/m ³	998.2 kg/m ³
c_p	460 J/(kg K)	1600 J/(kg K)	4182 J/(kg K)
λ	28 W/(m K)	0.23 W/(m K)	0.6 W/(m K)
η			0.001003 Pa s

Tabelle 1: Materialdaten

Durch den in der transienten Berechnung ermittelten Wert für die Abkühlung der Schmelze ($\Delta T_{cooling}$) von 216 K über den Zykluszeitraum ($t_{cooling}$) von 20 s kann ein äquivalente Wärmestromdichte von 13400 W/m² für die Kontaktfläche Schmelze-Werkzeug berechnet und für die stationären Betrachtungen als thermische Randbedingung überführt werden. Einen detaillierten Vergleich der Ergebnisse des transienten Modells mit denen des vereinfachten stationären Modells zeigen Abbildung 16 und Abbildung 17. Während in den ersten Zyklen große Abweichungen zwischen transients und stationärer Berechnung auftreten, bilden die stationären Berechnungen im “eingeschwungenen” Zustand (nach 15 Zyklen) den mittleren Wert der zeitlichen Verläufe von T_{max} und T_{min} in der Kontaktfläche ab. Für die Differenz zwischen Vor- und Rücklauftemperatur des Kühlmittels

am Outlet (ΔT_{outlet}) stellt der Wert der stationären Rechnung den oberen Grenzwert dar, dem sich der transiente Verlauf asymptotisch annähert.

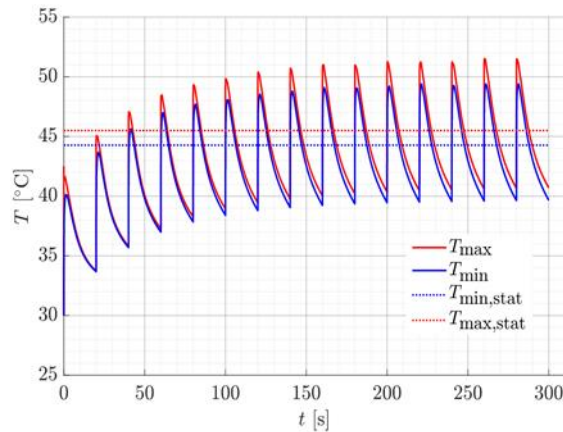


Abbildung 16: Maximale und Minimale Temperatur in der Kontaktfläche Schmelze-Werkzeug (Vergleich transiente vs. stationäre Berechnung)

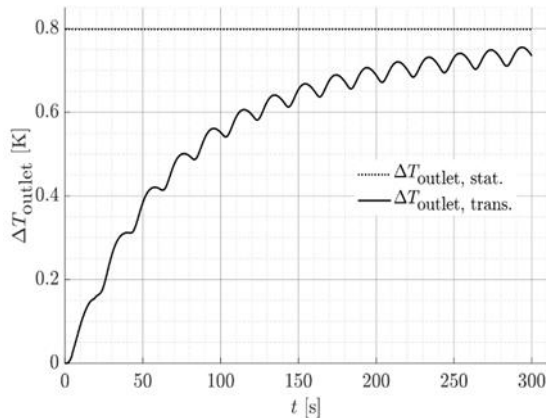


Abbildung 17: Differenz zwischen Vor- und Rücklauftemperatur am Outlet (Vergleich transiente vs. stationäre Berechnung)

Auch wenn die zeitlichen Veränderungen der einzelnen Größen bei stationärer Betrachtung naturgemäß verloren gehen, stehen die Ergebnisse der stationären Betrachtung durchaus in guter Korrelation mit denen der transienten Berechnung und können daher für eine erste Bewertung der verschiedenen Mischerkonfigurationen herangezogen werden.

Erweiterung des Parameterraums und Abgleich mit analytischen Lösungen

Ergänzend zu den Ergebnissen der bisherigen numerischen Untersuchungen wurde der Parameterraum auf niedrigere Geschwindigkeiten von 0,5 m/s ($Re \approx 4000$) bzw. 0,1 m/s ($Re \approx 800$) erweitert. Gerade bei dem unteren Wert ist von nahezu laminarer Rohrströmung auszugehen, bei der - basierend auf den bisherigen Ergebnissen - mit besonders großem Einfluss der statischen Mischer auf die Wärmeübertragung zu rechnen ist. Um das Rechenmodell für diesen Geschwindigkeitsbereich sowie insgesamt zu verifizieren, wurden die Werte für T_{outlet} bzw. ΔT_{outlet} (Differenz zwischen Vor- und Rücklauftemperatur des Kühlmittels) mit denen der analytischen Lösung nach der folgenden Gleichung verglichen.

$$T_{fluid}(x) = T_0 + \frac{\dot{q} d \pi}{\dot{m} c_p} x$$

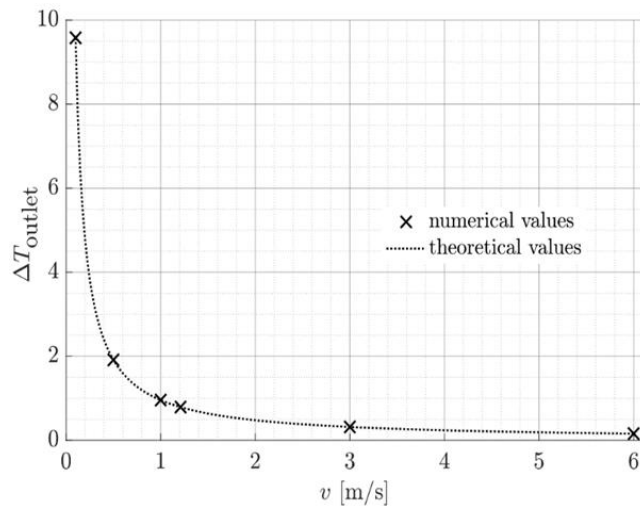


Abbildung 18: : Vergleich Rechnung – analytische Lösung bei 13400 W/m²

Abbildung 18 zeigt die Kurve der theoretischen Lösung und die berechneten Einzelwerte für die betrachteten Geschwindigkeiten von 0,1 m/s; 0,5 m/s; 1 m/s; 1,21 m/s; 3 m/s und 6 m/s. Wie zu erkennen, stimmen die berechneten Werte sehr gut mit den theoretischen Werten überein, wobei bei der Bestimmung der Temperaturdifferenz bzw. der mittleren Temperatur am Outlet zwingend die massenstrom-gewichteten Größe auszuwerten ist. Diese unterscheidet sich – gerade bei kleineren Strömungsgeschwindigkeiten – erheblich von der über die Fläche gewichteten Durchschnittstemperatur, da die Strömungsgeschwindigkeit an der Wand des Kühlkanals signifikant geringer ist, als in seiner Mitte und so bei der flächenbezogenen Mittelung die sehr warme Randschicht einen zu großen Anteil zur Durchschnittstemperatur beiträgt. Die flächengemittelte Temperatur liegt also immer über der massestromgewichteten Temperatur. Je homogener die Temperaturverteilung über den Kühlkanalquerschnitt ist, desto geringer werden dabei die Unterschiede. Tatsächlich kann daher der Quotient aus $\Delta T_{\text{outlet,area}} / \Delta T_{\text{outlet,mass}}$ als eine Art Kennzahl genutzt werden, um die Homogenisierung des Temperaturprofils durch Mischer - oder andere Effekte (z.B. Pulsationsströmungen) - zu quantifizieren. Ein Wert von 1 steht hier für eine ideal gleichmäßige Temperaturverteilung.

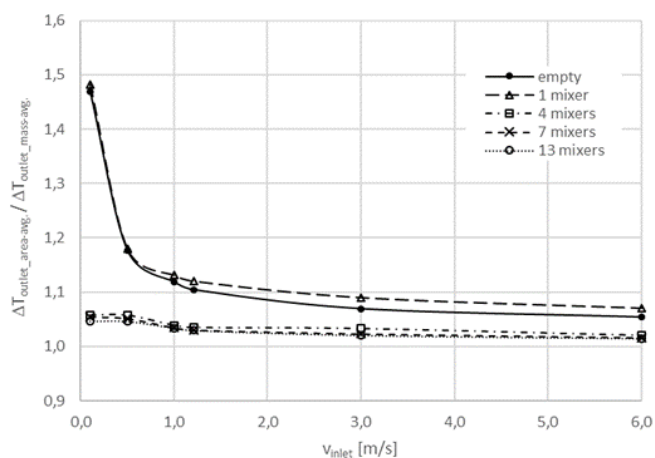


Abbildung 19: Homogenisierungsmaß - Quotient aus flächen- und massestrom-gewichteter mittlerer Temperaturdifferenz am Outlet

Abbildung 19 zeigt den Verlauf dieses Quotienten für verschiedene Mischerkonfigurationen und Strömungsgeschwindigkeiten. Wie zu erwarten, wächst der Quotient beim leeren Kühlkanal für geringe Strömungsgeschwindigkeiten stark an, da die Temperaturverteilung über den Querschnitt im laminaren Bereich immer inhomogener wird. Auch die Verwendung eines Mixers am Anfang des Kühlkanals kann hier keine Abhilfe schaffen. Die Verwendung von 4 oder mehr Mixern, welche äquidistant über die gesamte Länge des Kanals verteilt sind, zeigt jedoch einen deutlichen Effekt. Hier steigt der Quotient lediglich auf Werte von etwa 1,05 im Gegensatz zu 1,48 bei leerem Kanal, was den positiven Einfluss der Mixer auf die Homogenisierung der Temperaturverteilung im Bereich niedriger Reynoldszahlen auch zahlenmäßig belegt. Für hohe Strömungsgeschwindigkeiten sind die Effekte der Mixer hingegen deutlich weniger ausgeprägt. Dies ist auch bei weiteren Ergebnissen deutlich zu erkennen.

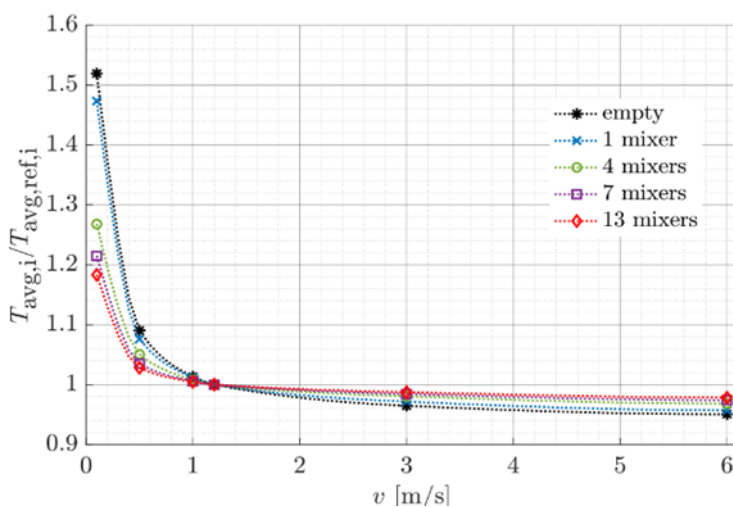


Abbildung 20: Kontaktflächentemperatur – normiert auf den Wert der jeweiligen Variante bei 1,21 m/s

Abbildung 20 zeigt die mittlere Temperatur in der Kontaktfläche bezogen auf die Temperatur der jeweiligen Variante bei einer Geschwindigkeit von 1,21 m/s. Klar zu erkennen ist, dass bei Erhöhung der Geschwindigkeit kaum Unterschiede unter den Varianten auftreten, wohingegen sich bei einer Reduktion der Geschwindigkeit deutliche Unterschiede zeigen. So verzeichnet die Variante ohne Mixer eine Temperaturerhöhung in der Kontaktfläche von über 50% bei Reduktion der Geschwindigkeit auf 0,1 m/s, wohingegen es bei der 13 Mixer Variante hier nur etwa 20% sind. Noch deutlicher wird der Einfluss der Mixer, wenn die Temperatur auf die Werte des leeren Kühlkanals bei der jeweiligen Geschwindigkeit bezogen werden (Abbildung 21).

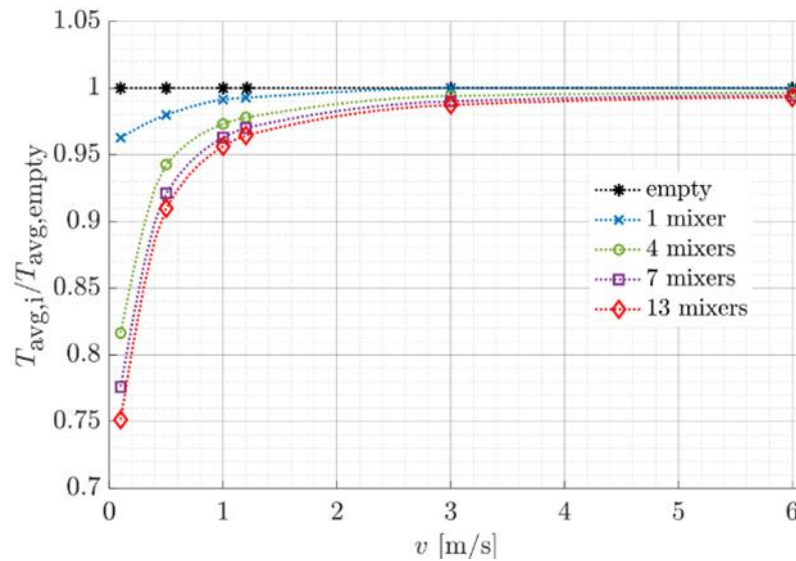


Abbildung 21: Kontaktflächentemperatur bezogen auf den Wert des leeren Kanals bei der jeweiligen Geschwindigkeit

Hier können bei 0,1 m/s im Vergleich zum leeren Kühlkanal bis zu 25% Temperaturreduktion erzielt werden (13 Mischer), wohingegen bei 6 m/s praktisch keine Unterschiede unter den Varianten mehr auszumachen sind.

Weitere Untersuchungen umfassten den Einfluss der Wärmeleitfähigkeit sowie der eingebrachten Wärmestromdichte. Abbildung 22 zeigt die Ergebnisse für verschiedene Wärmestromdichten bei einer Fließgeschwindigkeit von 1,21 m/s (wiederum bezogen auf den Wert des leeren Kanals bei der jeweiligen Wärmestromdichte). Zu erkennen ist, dass der positive Einfluss der Mischer auf die Wärmeübertragung umso größer ausfällt, je größer die thermische Belastung ausfällt, also je größer die eingebrachte Wärmestromdichte ist. Wie zu erwarten, zeigen die gleichen Auswertungen bei anderen Fließgeschwindigkeiten, dass dies umso ausgeprägter ausfällt, je geringer die Geschwindigkeit ist (Abbildung 23 und Abbildung 24). Bei 6 m/s sind erneut kaum noch Unterschiede unter den Varianten feststellbar.

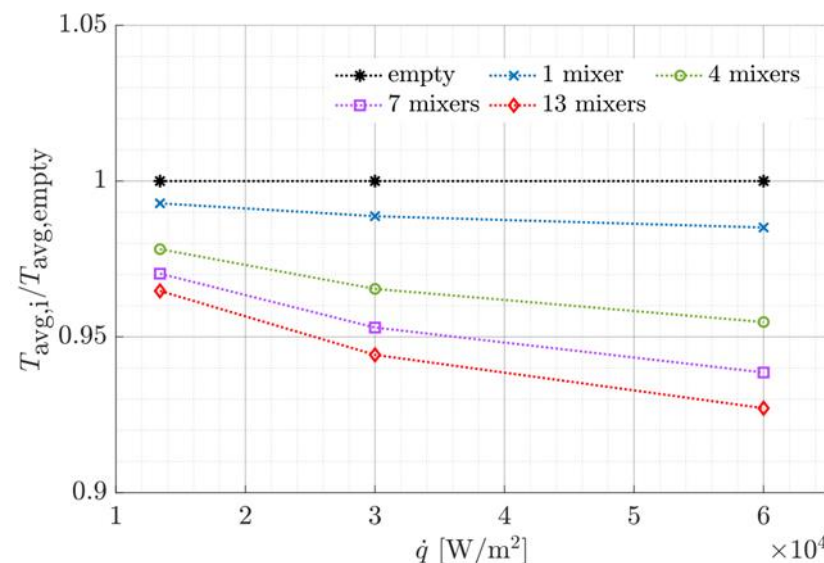


Abbildung 22: Bezogene Temperatur in der Kontaktfläche bei verschiedenen Wärmestromdichten ($v = 1,21 \text{ m/s}$)

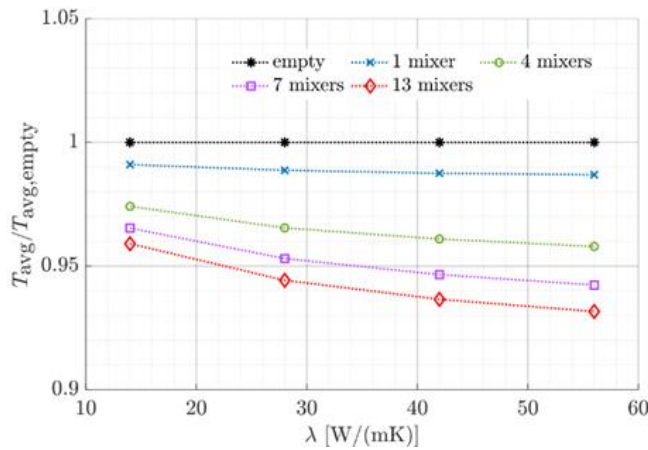


Abbildung 23: Bezogete Temperatur in der Kontaktfläche bei verschiedenen Wärmestromdichten ($v = 0,5$ m/s)

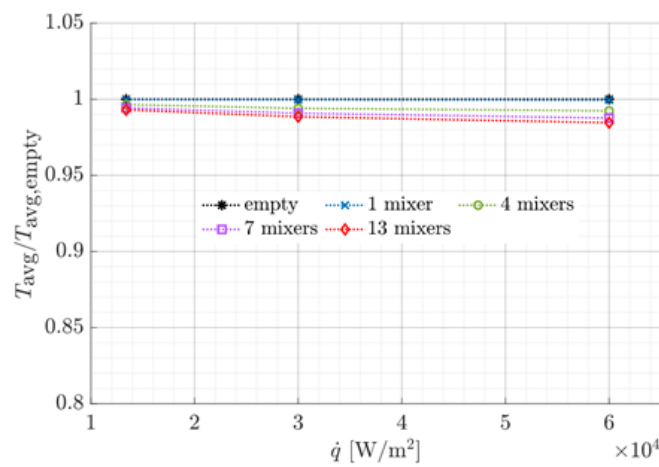


Abbildung 24: Bezogete Temperatur in der Kontaktfläche bei verschiedenen Wärmestromdichten ($v = 6$ m/s)

Die Betrachtung der Wärmeleitfähigkeit des Werkzeugstahls liefert ein ähnliches Ergebnis. Die Temperatur in der Kontaktfläche sinkt, je besser das Material des Spritzgießwerkzeugs die Wärme leitet, also je größer λ ist. Abbildung 25 zeigt dies für den leeren Kühlkanal.

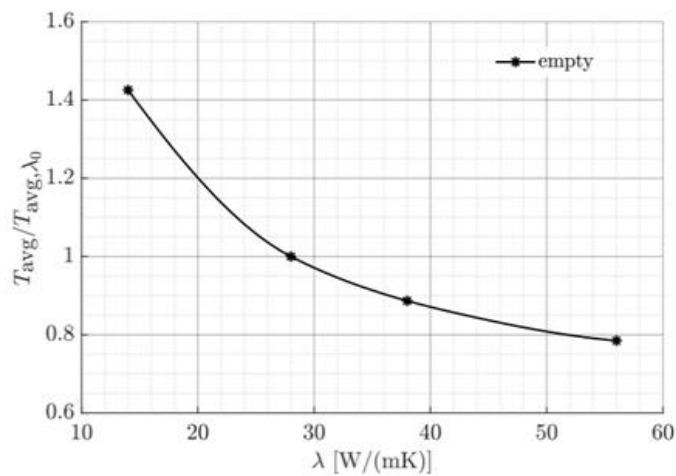


Abbildung 25: Normierte Temperatur in der Kontaktfläche bei verschiedenen Wärmeleitfähigkeit für den leeren Kühlkanal

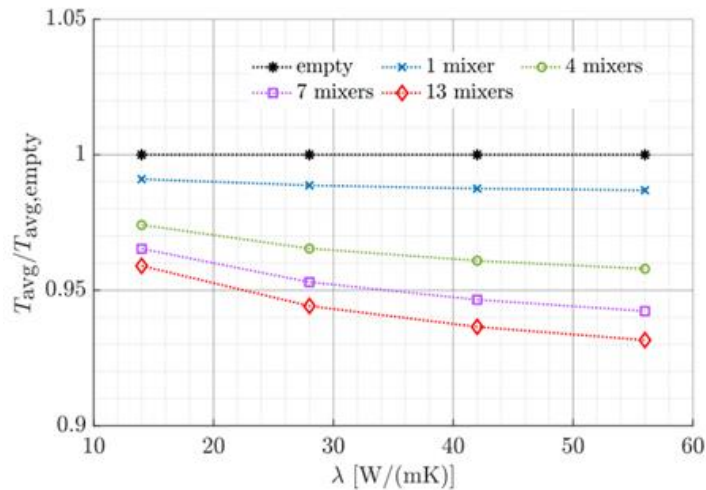


Abbildung 26: Normierte Temperatur in der Kontaktfläche bei verschiedenen Wärmeleitfähigkeit für verschiedene Konfigurationen

Abbildung 26 stellt exemplarisch die Ergebnisse für alle Mischervarianten bezogen auf die Leerrohrvariante für die Geschwindigkeit von 1,21 m/s und eine Wärmestromdichte von 30000 W/m² dar. Es zeigt sich, dass Mischer besonders effektiv sind, wenn die Wärmeleitfähigkeit besonders hoch ist. Zusammenfassend bestätigen sich die bisherigen Erkenntnisse, dass Mischer in all den Szenarien großen Nutzen mit sich bringen, in denen ohne sie ein großer Temperaturgradient zwischen der Kühlmitteltemperatur am Rand und in der Mitte des Kühlkanals auftreten würde. Dies kann zahlenmäßig etwa durch den Quotienten $\Delta T_{outlet,area}/\Delta T_{outlet,mass}$ erfasst werden, zeigt sich aber auch in entsprechenden Kontourplots (Abbildung 27).

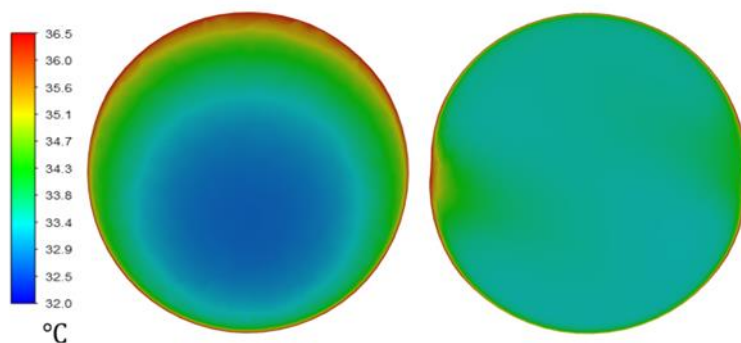


Abbildung 27: Temperaturprofil am Outlet (1,21 m/s; 60000 W/m²) – ohne Mischer links und mit 13 Mixern rechts

Erweiterung des Parameterraums der transienten Berechnungen

Transiente Rechnungen für den leeren Kanal und die 7 Mischer Variante wurden ebenfalls auf weitere Geschwindigkeiten ausgeweitet. Abbildung 28 zeigt die durchschnittliche Temperatur der Schmelze für verschiedene Varianten am Ende des 15ten Zyklus. Es ist klar zu erkennen, dass die Varianten mit Mixern nicht so stark auf eine Geschwindigkeitsänderung reagieren, wie die Leerrohrvarianten. So kommt es bei einer Geschwindigkeitsreduktion von 1,21 m/s auf 0,5 m/s lediglich zu einer Temperaturerhöhung von etwa 1,4 K, wohingegen beim leeren Kühlkanal fast 3 K erreicht werden. Dies deckt sich mit Ergebnissen, der stationären Voruntersuchungen. Auch bei einer Reduktion von 1,21 m/s auf 1 m/s ist die Temperaturerhöhung bei der Leerrohrvariante etwa doppelt so hoch wie bei derjenigen mit 7 Mixern (0,3 K (Mischer) bzw. 0,6 K (leer)). Bemerkenswert ist ferner, dass die Variante mit Mixern bei 0,5 m/s nahezu die gleichen Werte liefert, wie die Leerrohrvariante bei 1,21

m/s. Mischer können also ggf. auch für eine Reduktion der Strömungsgeschwindigkeit bei gleichbleibender Kühlleistung genutzt werden.

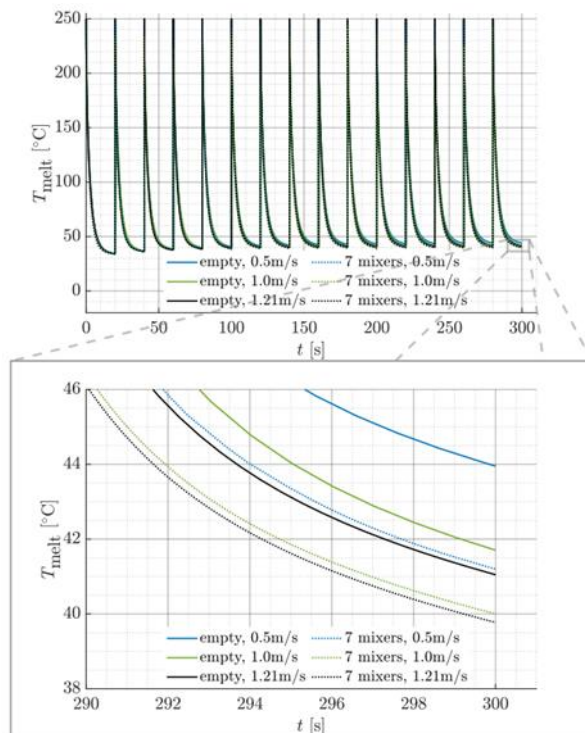


Abbildung 28: Schmelzetemperatur nach 15 Zyklen (à 20s) für Leerrohr und 7 Mischer-Variante bei verschiedenen Geschwindigkeiten

Die Ergebnisse wurden im Rahmen eines Open-Access Journals und bei einer Konferenz veröffentlicht:

Anders, D.; Reinicke, U.; Baum, M. (2023): Analysis of heat transfer enhancement due to helical static mixing elements inside cooling channels in machine tools. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology

Anders, D.; Reinicke, U.; Baum, M. (2023): Untersuchung der Wärmeübergangsintensivierung mit Hilfe statischer Mischer in wassergekühlten Werkzeugen. 12. Anwendertreffen SAXSIM (SAXon Simulation Meeting), Technische Universität Chemnitz, 07.03.2023.

Simulation einer Pulsationsströmung

Um den Einfluss der Pulsationsströmung auf die Abkühlung der Kunststoffschmelze zu untersuchen, wurde der ursprüngliche Ausschnitt aus dem Spritzgusswerkzeug betrachtet. Da stationäre Berechnungen zur Erfassung zeitlich veränderlicher Strömungsgeschwindigkeiten nicht geeignet sind und es im Bereich der Pulsationsströmung noch keine Erfahrungswerte gibt, wurden zunächst 15 Spritzgusszyklen à 20 s simuliert, um zu einem „eingeschwungenen“ Zustand zu gelangen. Bei einer (Grund-)Strömungsgeschwindigkeit von 1 m/s, einer frei wählbaren Schwingungsamplitude von 0,5 m/s und einer Pulsationsfrequenz von 4 Hz stellte sich heraus, dass eine stetige Veränderung der Strömungsgeschwindigkeit sehr kleine Zeitinkremente erfordert, um Konvergenz zu erzielen. Dies führte zu einer extrem langen Rechenzeit für die betrachteten 15 Spritzgusszyklen. Eine Auswertung der mittleren Schmelzetemperatur zeigte, dass die gewählte Konfiguration hinsichtlich dieses Parameters praktisch nicht von der Variante mit konstanter Strömungsgeschwindigkeit von 1 m/s unterschieden konnte. Eine Verkürzung der Zykluszeit durch die Verwendung von Mischern war mit dieser Pulsationsströmung nicht möglich. Die Frage, ob eine Veränderung der Parameter

(Grundströmungsgeschwindigkeit, Amplitude, Frequenz) günstigere Ergebnisse liefern würde, konnte aufgrund der extrem hohen Rechenzeit für alle 15 Zyklen nicht beantwortet werden. Daher wurde ein neues, transientes Rechenmodell erstellt, welches ausschließlich das Fluid innerhalb des Kühlkanals - ohne Werkzeug, Schmelze und Mischer - erfasste. Durch die fehlenden Massen von Werkzeug und Schmelze konnte schnell ein stationärer Zustand erreicht werden, was die Rechenzeit deutlich senkte und die Untersuchung mehrerer Varianten ermöglichte. Die durchschnittliche Temperatur an der Außenwand des Kühlkanals (Manteltemperatur) sowie die Temperatur(-verteilung) am Outlet wurden ausgewertet. Untersucht wurden - neben der konstanten Strömung (sowohl transient als auch stationär berechnet) - sinusförmige Pulsationsströmungen mit 2, 5, 10 und 20 Hz sowie eine Strömung mit einem kurzen Impuls von +1 m/s alle 0,2 s (Abbildung 29).

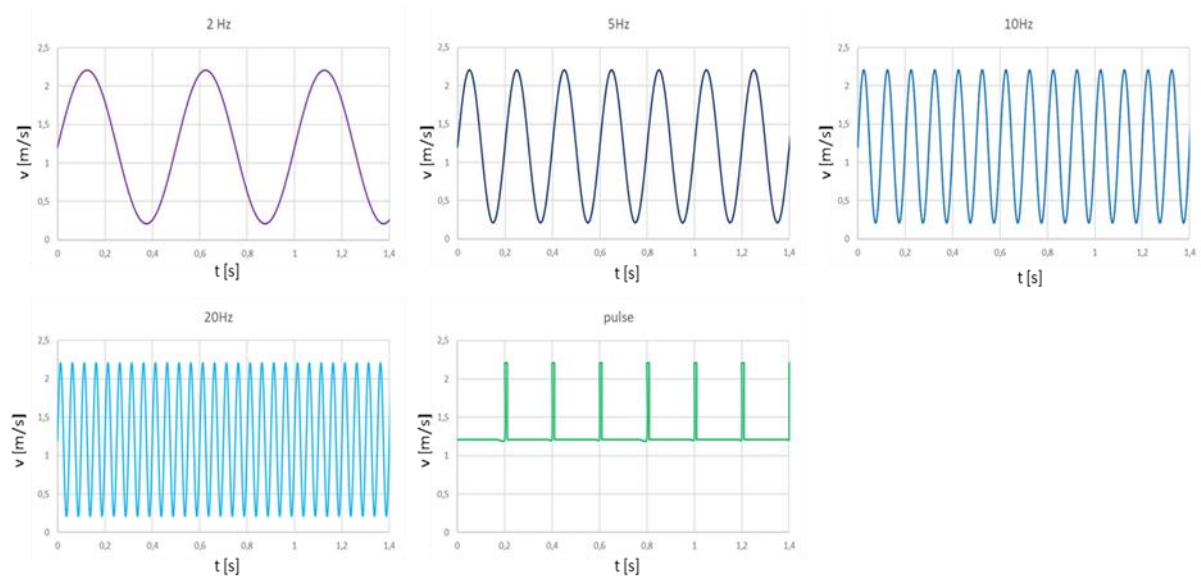


Abbildung 29: Untersuchte Pulsationsströmungen zur Grundströmung 1,21m/s

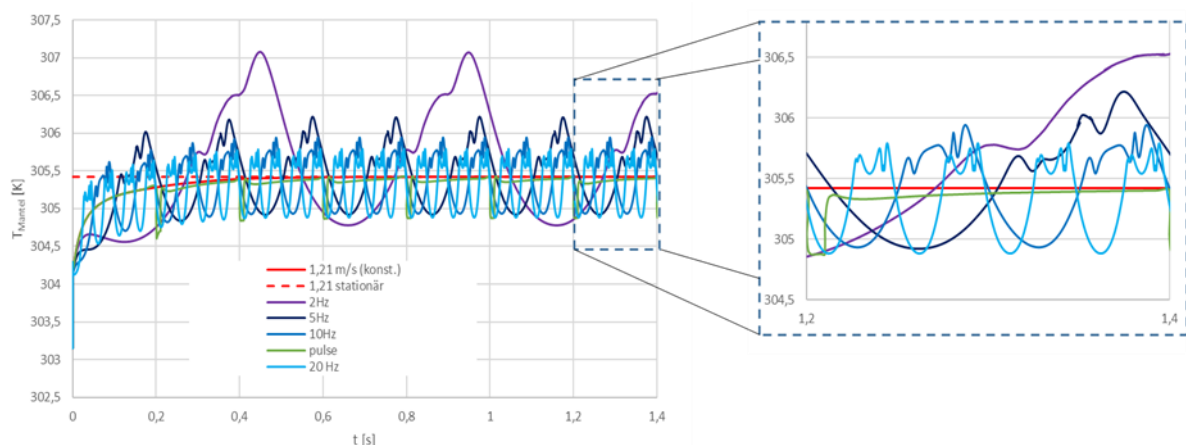


Abbildung 30: Zeitlicher Verlauf der Manteltemperatur in Kelvin

Die Abbildung 30 fasst die Ergebnisse der Manteltemperatur zusammen. Es ist erkennbar, dass der eingeschwungene Zustand nun nach etwa 1,4 Sekunden erreicht wird, was zu einer erheblichen Verkürzung der Rechenzeit führt. Die zeitliche Veränderung der Strömungsgeschwindigkeit hat einen deutlicheren Einfluss auf die mittlere Temperatur der Kühlkanalwand. Im Gegensatz zur ursprünglichen Auswertung der Schmelztemperatur über 15 Zyklen ist hier eine zeitliche Abhängigkeit des Verlaufs aufgrund der Pulsation zu beobachten. Offenbar fungieren die Masse und

spezifische Wärmekapazität des Werkzeugs und der Schmelze als Puffer, die die Schwankungen der Temperatur an der Kühlkanalwand, die sich hier zeigen, bis zum Erreichen der Schmelze glätten. In allen Fällen schwanken die Werte jedoch um den Referenzwert mit konstanter Geschwindigkeit, so dass keine verbesserte Wärmeübertragung angenommen werden kann, was mit den bereits vorliegenden Ergebnissen nach 15 Zyklen übereinstimmt. Nur die 20 Hz-Variante scheint im Durchschnitt leicht unter dem Referenzwert zu liegen, während die 2 Hz-Variante im Durchschnitt leicht darüber liegt.

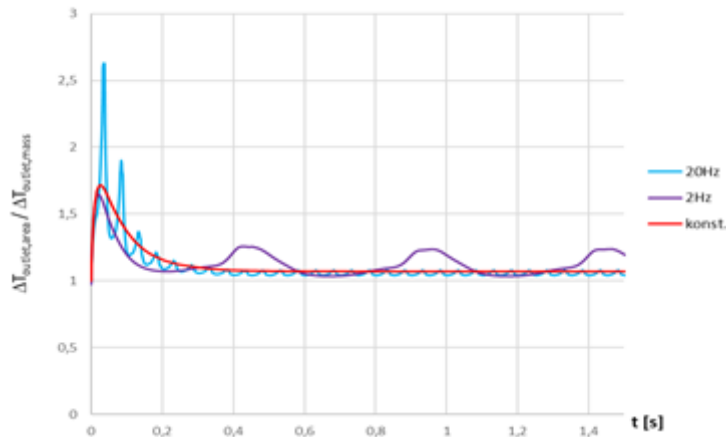


Abbildung 31: Homogenisierungsmaß für 3 ausgewählte Varianten

Eine Auswertung des Quotienten $\Delta T_{outlet,area} / \Delta T_{outlet,mass}$ für ausgewählte Varianten (als Maß für die Homogenisierung des Temperaturprofils am Outlet) stellt Abbildung 31 dar. Wie bereits in dem Verlauf der Manteltemperatur zu erkennen war, zeigt sich auch hier eine leichte Verbesserung bei einer Pulsationsfrequenz von 20 Hz (von 1,07 auf etwa 1,06), wohingegen eine Pulsation mit 2 Hz tendenziell zu höheren Werten als die Referenz mit konstanter Geschwindigkeit führt (Zunahme von 1,07 auf ca. 1,14). Es zeigt sich erneut, dass offenbar die Größe der Homogenisierung des Temperaturprofils - erfasst über den Quotienten $\Delta T_{outlet,area} / \Delta T_{outlet,mass}$ - auch als Indikator für die Veränderung anderer Temperaturen, wie durchschnittliche Schmelze- bzw. Manteltemperatur herangezogen werden kann.

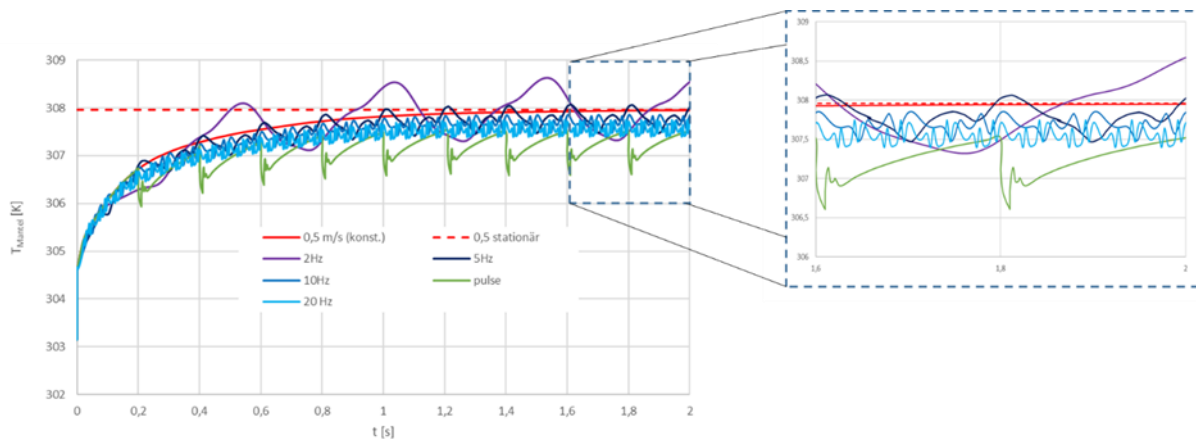


Abbildung 32: Manteltemperatur für verschiedene Varianten bei einer Grundströmungsgeschwindigkeit von 0,5m/s

Da die Ergebnisse der bisherigen Mischer Untersuchungen nahelegen, dass im Bereich geringerer Grundgeschwindigkeiten deutlichere Effekte zu erwarten sein könnten, wird der Parameterraum auch für diese Untersuchung auf eine Grundgeschwindigkeit von 0,5 m/s erweitert. Untersucht werden erneut Frequenzen von 2, 5, 10 und 20 Hz bei einer Amplitude von 0,25 m/s sowie die Strömung mit einem kurzen Impuls von +1 m/s alle 0,2 s. Wie Abbildung 32 zu entnehmen ist, bestätigt sich die Vermutung, dass der Einfluss einer Pulsationsströmung auf die Temperatur bei einer geringeren Grundfließgeschwindigkeit deutlicher ausfällt. So senkt eine sinusförmige Pulsationsströmung mit 20 Hz die zeitlich gemittelte Manteltemperatur um etwa 0,4 K, mit der betrachteten Impulsströmung kann eine Absenkung um nahezu 1 K erreicht werden.

Auch der Wert des Homogenisierungsmaßes $\Delta T_{\text{outlet,area}} / \Delta T_{\text{outlet,mass}}$ am Outlet sinkt von 1,13 für die konstante Geschwindigkeit von 0,5 m/s auf etwa 1,09 bei einer sinusförmigen Pulsation mit 20 Hz (Abbildung 33). Die gleichförmigere Temperaturverteilung ist auch in entsprechenden Konturplots gut zu erkennen (Abbildung 34). Wie zu erwarten, liegen die Werte bei 0,5 m/s Grundfließgeschwindigkeit generell höher als die bei 1,21 m/s, wo es bereits durch die hohe Geschwindigkeit zu deutlich ausgeprägten Turbulenzen innerhalb der Strömung kommt.

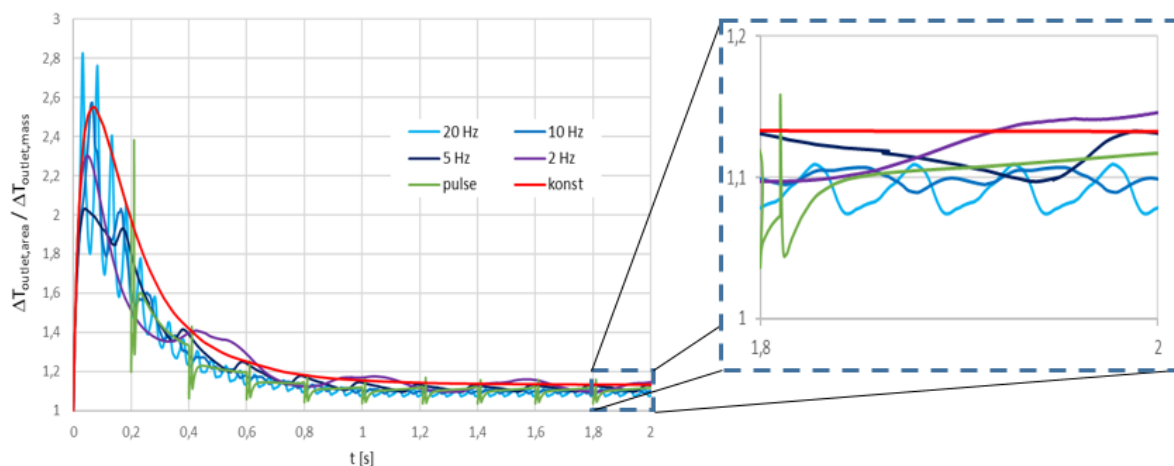


Abbildung 33: Homogenisierungsmaß für die Varianten mit 0,5m/s Grundfließgeschwindigkeit

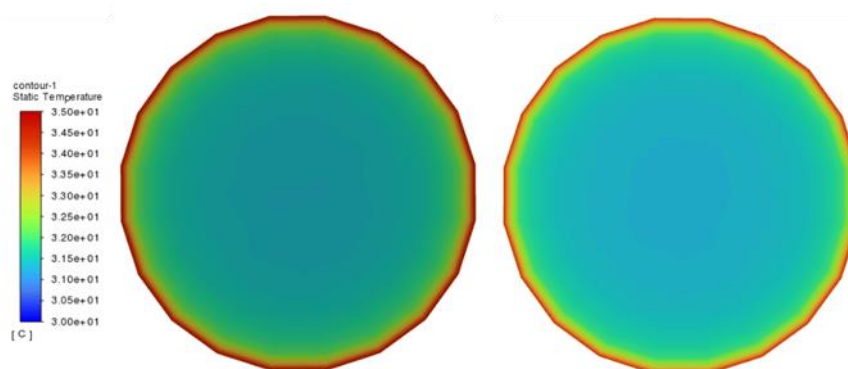


Abbildung 34: Temperaturprofil am Outlet für konstante Fließgeschwindigkeit von 0,5m/s (links) und sinusförmiger Pulsationsströmung mit 0,25m/s Amplitude bei 20Hz

AP 3: Konstruktive Integration in Spritzgießwerkzeuge

Eine Herausforderung stellt die Integration der statischen Mischelemente in die Spritzgießwerkzeuge dar. Die statischen Mischelemente müssen zum einen in die Temperierbohrungen eingebracht und zum anderen positioniert und bestenfalls fixiert bzw. auf Position gehalten werden können.

Das Ziel bei der Auslegung der Temperierkanäle für die Flüssigtemperierung von Spritzgießwerkzeugen ist das Erreichen einer homogenen Werkzeugwandtemperatur an der Kavitätsoberfläche. Hierzu ist es erforderlich den Verlauf und die Ausgestaltung der Kontur der Kanäle den konstruktiven Gegebenheiten im Spritzgießwerkzeug, der Bauteilgeometrie und der zur Verfügung stehenden Temperiertechnologie (wie z.B. Pumpenleistung und Einstellmöglichkeiten für Fluidströme) anzupassen. Insbesondere bei Bauteilen mit Freiformflächen stellt das Einstellen einer homogenen Werkzeugwandtemperatur eine Herausforderung dar. Für die Versuche im Polymer-Labor wurde als Bauteilgeometrie eine Probeplatte in Anlehnung an Norm DIN EN ISO 294-3:2003 (D); Typ D2 eingesetzt. Hierfür wurden Wechseleinsätze für ein vorhandenes Stammwerkzeug mit Zweifachkavitätausführung mit modularem Aufbau für die Erzeugung von Durchbrüchen und thermischer Trennung zw. den Kavitäten konzipiert und beschafft. Die Abbildung 35 zeigt links exemplarisch den Wechseleinsatz mit Tunnelanbindung sowie rechts das zugehörige Standard-Temperierlayout. Die einfachste und kostengünstigste Einbringung von Temperierkanälen, die in der Praxis sehr weit verbreitet ist und auch hier genutzt wurde, erfolgt mittels Tieflochbohren. Um eine möglichst homogene Temperatur zu erreichen, müssen in der Standardtemperieranwendung verschiedene Bohrungen angelegt und so mittels Dichtstopfen verschlossen werden, dass der in Abbildung 35 rechts in „blau“ dargestellte Fluidstrom für das Temperiermedium entsteht.

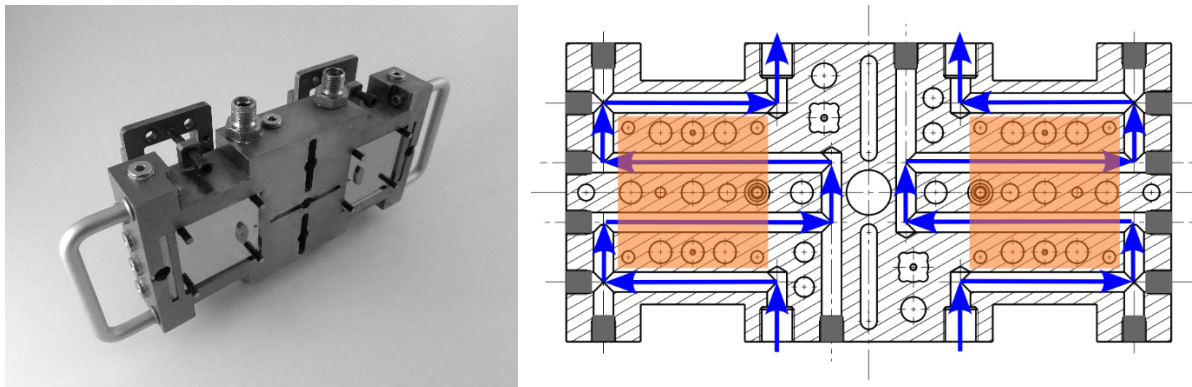


Abbildung 35: Wechseleinsatz für Versuchswerkzeug; links: Wechseleinsatz mit Tunnelanschnitt und Konturdurchbruch in der Probenplatte in Anlehnung an DIN EN ISO 294-3:2003 (D); Typ D2, rechts: Temperierkanallayout (orange: Schatten Plattengeometrie, blau: Fließweg Fluid, grau: Dichtstopfen)

Die Statischen Mischelemente können bei dieser Standardumsetzung nicht in den Formeinsatz integriert werden. Um eine praxisnahe Anwendung zu haben und die Hürde für den späteren Einsatz der Mischsysteme in Unternehmen zu reduzieren, wurde bewusst auf die klassische Ausführung zurückgegriffen. Zur Integration der Mischelemente wurden die Ein- bzw. Ausgänge nicht mit fest integrierten Dichtstopfen versehen, sondern mit Schraubverschlüssen abgedichtet. Diese können entfernt und ganz gezielt die Mischelemente eingeführt werden, sodass eine Bestückung z.B. für Wartung und Reparatur direkt an der Spritzgießmaschine erfolgen kann (siehe Abbildung 36). Im Temperierlayout in Abbildung 35 rechts sind eine mit Mischelementen bestückte Kavität (links) und die Referenzkavität (rechts) mit Standardtemperierung dargestellt. Beide Temperierkreisläufe können wahlweise mit Mischelementen bestückt werden.

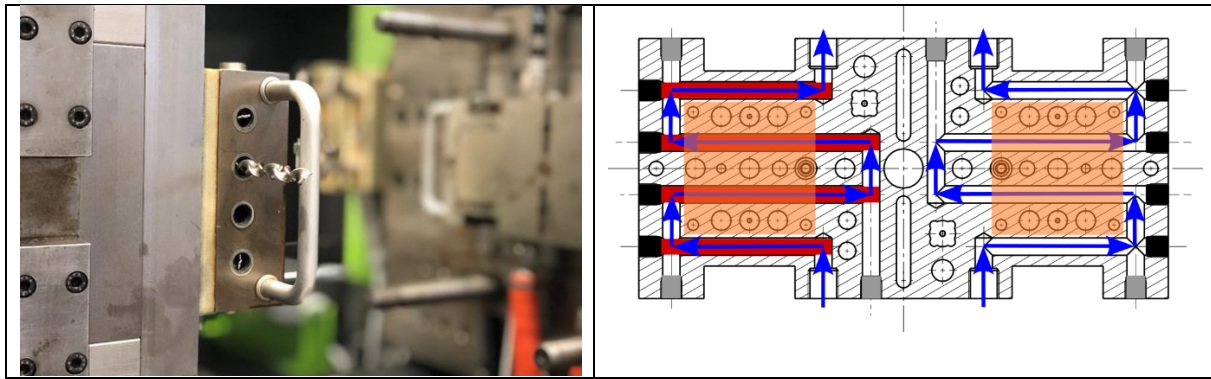


Abbildung 36: Ins Spritzgießwerkzeug integrierte statische Mischelemente, links: Einbausituation an der Spritzgießmaschine, rechts: Temperierlayout mit statischen Mischern und Referenzkavität (orange: Schatten Plattengeometrie, rot: statische Mischer, blau: Fließweg Fluid, grau: Dichtstopfen, schwarz: Schraubverschlüsse)

AP 4: Geometrieoptimierung Mischelemente

Im AP4 (**Geometrieoptimierung Mischelemente**) wurden Mischer hinsichtlich ihrer optimalen Gestaltänderung untersucht. Dank einer genauen Betrachtung der Optimierungsergebnisse konnten funktionale Zusammenhänge zwischen einigen Größen identifiziert werden. Es wurde festgestellt, dass die mittlere Temperatur in der Kontaktfläche des Modells mit einem Mischer offenbar linear von dem Wendungswinkel abhängt und der Druckverlust etwa quadratisch mit diesem Parameter steigt (Abbildung 37). Diese Erkenntnisse können letztendlich zu einer analytischen Lösung der Optimierungsaufgabe führen. Obwohl es aufgrund unerwarteter Probleme innerhalb der parametrisierten CAD Geometrieerzeugung des Programms CAESSES zu einigen unbrauchbaren Mischerkonfigurationen kam, die den Optimierungsrechenlauf zum Absturz brachten, ist es trotzdem vielversprechend, dass funktionale Zusammenhänge gefunden wurden, die zu einer erfolgreichen Optimierung führen.

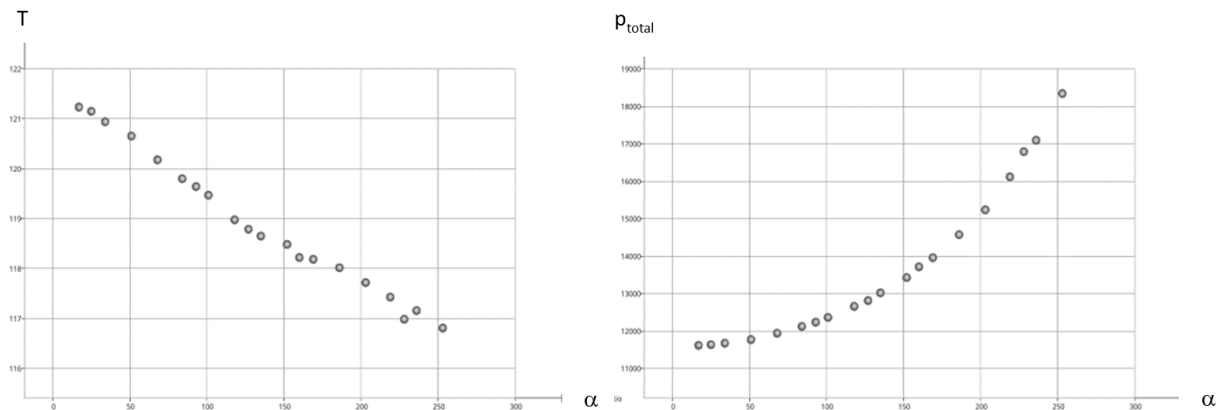


Abbildung 37: Abhängigkeit der mittleren Temperatur (links) und des Druckverlusts von der Wendung des Mischers

AP 5: Integration des numerischen Modells in die Spritzgießsimulation

Im Rahmen des AP5 (**Integration des numerischen Modells in die Spritzgießsimulation**) wurden umfangreiche Voruntersuchungen zur numerischen Approximation von Spritzgießsimulationsmodellen für die Füllphase durchgeführt. Diese wurden im Rahmen eines Open-Access Journals veröffentlicht:

Baum, M., Jasser, F., Stricker, M., Anders, D., Lake, S. Numerical simulation of the mold filling process and its experimental validation. Int J Adv Manuf Technol 120, 3065–3076 (2022).

Die Integration der Ergebnisse aus AP 2 kann in die Spritzgießsimulation erfolgreich implementiert werden. Hierfür können die zuvor mithilfe der statischen Mischer angepassten Wärmeleitfähigkeiten in der Datenbank von Cadmould modifiziert und übernommen werden. Durch eine möglicherweise partielle und dennoch einfache Integration in das bestehende numerische Modell ist es möglich, Änderungen von verschiedenen Varianten schnell und unkompliziert einzubeziehen. Um die erforderlichen Wärmeleitfähigkeiten zu ermitteln, bildet eine vorherige Simulation zur Bestimmung des modifizierten Wärmeübergangs die Grundlage.

Die Validierung der Simulationsergebnisse im Spritzgießwerkzeug wurde in AP7 integriert.

AP 6: Langzeituntersuchung Ablagerungseffekte

Ziel im AP 6 war es einen Versuchsumgebung zu konzipieren und aufzubauen, die es ermöglicht gleichzeitig, mehrere statische Mischelemente unter verschiedenen Prozessbedingungen hinsichtlich ihres Einflusses auf Ablagerungen im Temperierkanal zu untersuchen und der Standardsituation gegenüber zu stellen. Hierzu wurde der Ansatz gewählt mehrerer Einzelversuche zu einem Versuchsstand zusammenzuschalten. Es wird dadurch die Möglichkeit geschaffen, gleichzeitig mehrere statische Mischelemente unter verschiedenen Prozessbedingungen hinsichtlich ihres Einflusses auf Ablagerungen im Temperierkanal zu untersuchen. Das Gesamtversuchsszenario wurde definiert, dass unbehandeltes Leitungswasser und aufbereitetes (additiviertes) Prozesswasser bei unterschiedlichen Temperierkanal-Varianten zeitgleich zum Einsatz kommen kann. Weiterhin wurde definiert, dass die Standardtemperierung (ohne Mischelemente, zukünftige Bezeichnung „unbestückt“) und zwei verschiedene Mischervarianten getestet werden sollten. Herausforderung war es, den Versuchsstand so zu gestalten, dass die verschiedenen parallelaufenden Szenarien (Einzelversuchsstände) entkoppelt mit Einzelpumpen/-wassersträngen betrieben werden.

Herzstück des Versuchsstandes (siehe Abbildung 38) sind die Temperierplatten, die das Spritzgießwerkzeug mit den Temperierkanälen simulieren und in jedem Einzelversuchsstrang zum Einsatz kommen. Die Temperierplatte ist zweiteilig ausgeführt und kann aus einer Stahlqualität nach Wahl gefertigt werden. Für die Versuchsreihen wurde 1.2343 ESU ausgewählt, da diese Stahlqualität für Spritzgießwerkzeuge sehr häufig zum Einsatz kommt und auch der in AP3 konzipierte Versuchseinsatz aus dieser Stahlqualität gefertigt ist. Der zweiteilige Ausbau der Temperierplatte ermöglicht es, den Temperierkanal zu öffnen und die Ablagerungen, das sogenannte Fouling, mit verschiedenen Analysemethoden auszuwerten. Die Dimensionierung und das Gewicht der Probeplatten wurde auf die Anforderungen der Probenhalter der Analysegeräte abgestimmt. Die Ausführung der Temperierkanäle erfolgt wie in AP3 beschrieben, wobei die Temperierkanäle genau in der Trennebene der beiden Probeplatten eingearbeitet sind. zu sehen.

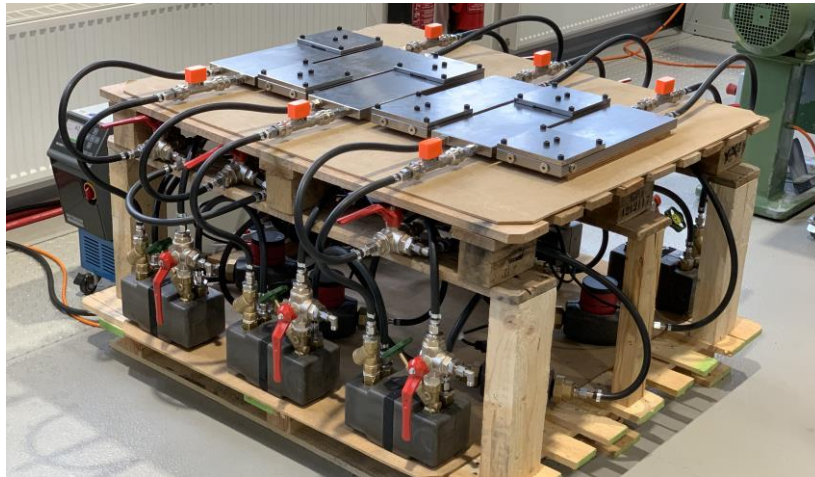


Abbildung 38: Versuchsstand für Langzeitmessung der Ablagerungseffekte

Der dargestellte Versuchsstand ermöglicht es zudem bei allen 6 Einzelsystemen zusätzlich eine Pulsationsströmung zu beaufschlagen. Hierauf wurde allerdings im Rahmen des Projektes verzichtet (siehe Ausführungen zu AP1: Pulsationsströmung).

Die Langzeitversuche wurden im Rahmen von Projekt- und Bachelorarbeiten begleitet. Für die statischen Mischer wurde in Abstimmung mit den APs 4 und 7 die in Abbildung 39 dargestellten Helical-Mischelemente und Federn eingesetzt und der Versuchsstand über einen Zeitraum von 6,5 Monaten mit einer Wassertemperatur von 75 °C betrieben.

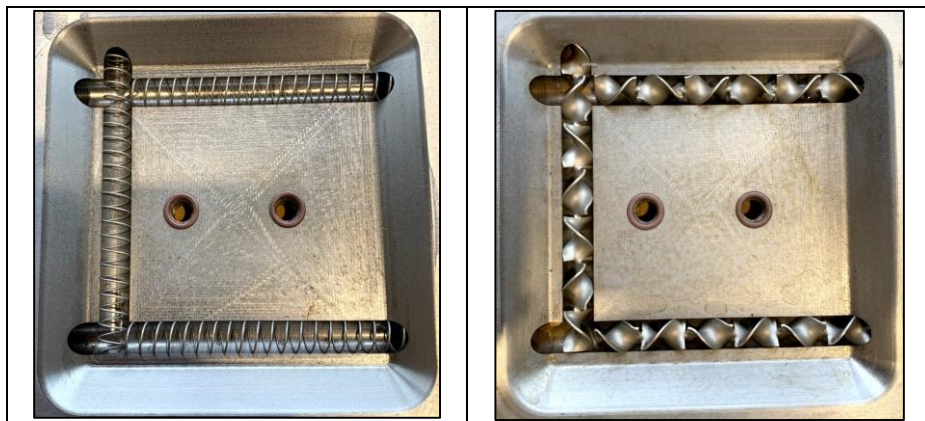


Abbildung 39: Temperierplatten mit Mischelementen (links: Feder, rechts: Helical-Mischelement)

Für die experimentelle Untersuchung und Analyse der Ablagerungseffekte wurde in einem ersten Schritt ein konfokales 3D-Laserscanning Mikroskop der Firma Keyence verwendet. Dabei wurden die Prüfplatten des Ablagerungsprüfstandes turnusmäßig ausgebaut und mit dem Mikroskop vermessen (siehe Abbildung 40). Die Auswertung der Messungen, über einem Untersuchungszeitraum von 182 Tagen, ist in Abbildung 41 visualisiert.

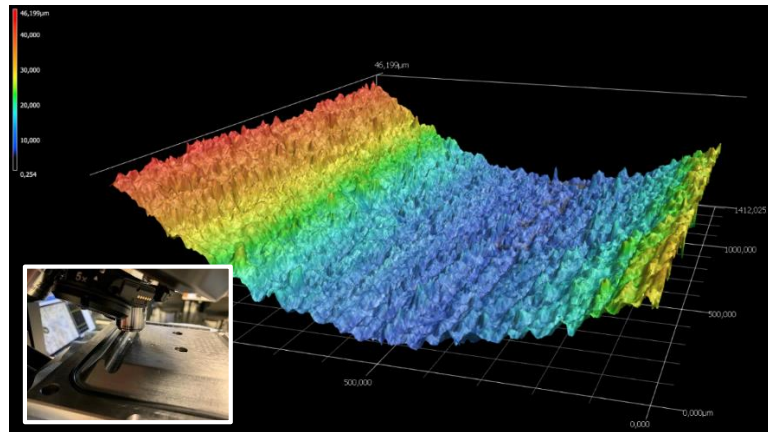


Abbildung 40: Einzelmessung an einer Prüfplatte des Ablagerungsprüfstandes mit dem konfokalen 3D-Laserscanning Mikroskop

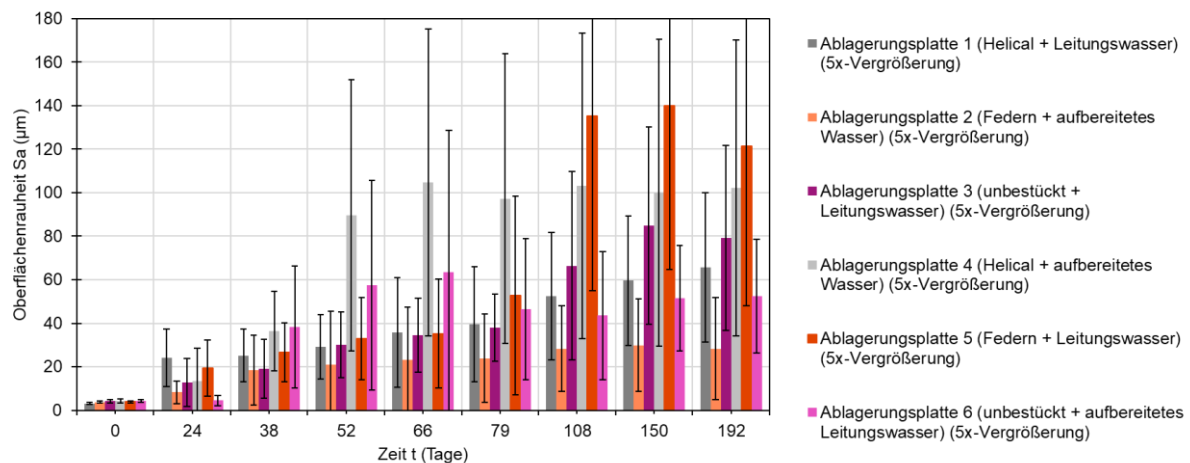


Abbildung 41: Langzeituntersuchung von Ablagerungseffekten: Rauheitsmessungen mit 5-facher Vergrößerung (Mittelwerte über 7 Messpunkte der Platten 1-6 mit Standardabweichung)

Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen deutlich, dass sich die statistischen Merkmale der an den Kühlkanälen gemessenen Oberflächenrauigkeiten zeitlich stark verändern. Es ist eine Zunahme der Mittelwerte in Kombination mit einer Erhöhung der Standardabweichung zu beobachten. Die hohen Werte bei der Standardabweichung deuten auf eine starke Streuung der gemessenen Rauigkeitswerte und somit auf eine sukzessive Zusetzung der Kanäle. Da das verwendete Mikroskop lediglich Messwerte zur Oberflächenrauheit liefert, kann daraus noch kein zeitliches Schichtdickenwachstum abgeleitet werden. Dennoch zeigen die in Abbildung 41 dargestellten Messwerte, dass die Maßnahmen in Form von verschiedenen Einsätzen (Federn, statische Mischer) keine signifikante Abschwächung des Foulingprozesses bewirken. Der Grund dafür liegt in der Tatsache, dass es sich hierbei um Korrosionsfouling handelt, welches im Wesentlichen durch Korrosionsmechanismen an der Oberfläche und weniger durch strömungsmechanische Faktoren beeinflusst wird.

Um das Schichtdickenwachstum besser quantifizieren und auch Aussagen zu lokalen Ablagerungseffekten treffen zu können, wurden die einzelnen Prüfplatten mit einem optischen 3D-Messsystem (System GOM ATOS III, GOM GmbH, Braunschweig) vermessen.

Die Abbildung 42 und die Abbildung 43 zeigen exemplarisch mit zwei ausgewählten Skalierungen die Auswertung der 3D-Vermessung der verschiedenen Ablagerungsplatten mit Leitungswasser und behandeltem Prozesswasser (Korrosionsschutz + Biozid). Die Farbverläufe in der Skalierung stellen dabei die Relation zu den CAD-Daten dar. Eine positive Abweichung zu den CAD-Daten verdeutlicht den Aufbau von Ablagerungen (zunehmende Rot-/Dunkelfärbung). Die Negativabweichung in den Ecken der Temperierkanäle (Blaufärbung) ist auf die produktionstechnische Herstellung der Kanäle mittels Tieflochbohrung zurückzuführen, hier liegt kein in der Temperierung begründeter begründeter Materialabtrag vor.

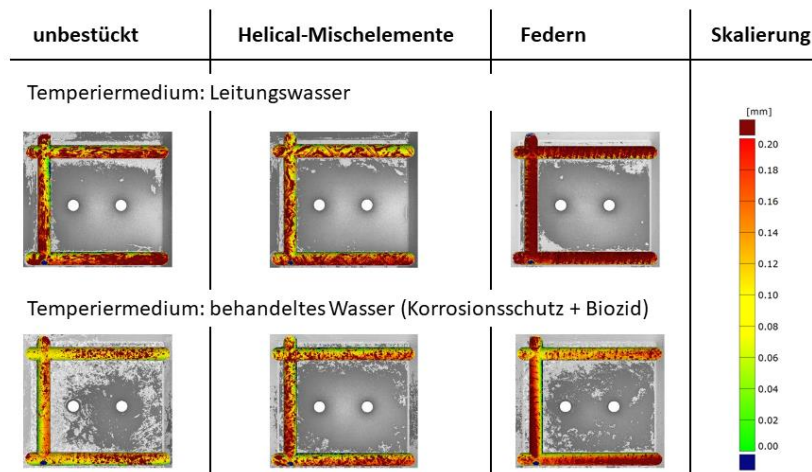


Abbildung 42: 3D-Vermessung der Ablagerungsplatten mit verschieden bestückten Temperierkanälen (Skalierung 0,2 mm)

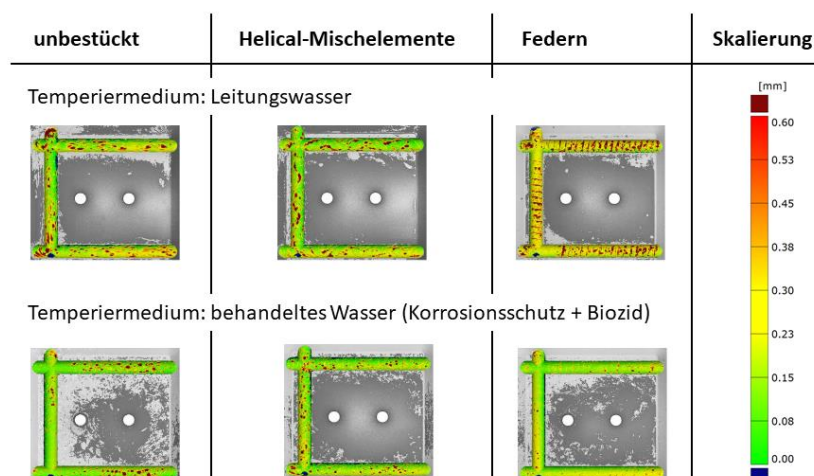


Abbildung 43: 3D-Vermessung der Ablagerungsplatten mit verschieden bestückten Temperierkanälen (Skalierung 0,6 mm)

Als Fazit lässt sich feststellen, dass bei den vorliegenden Untersuchungen das Einbringen von statischen Mischelementen unterschiedliche Auswirkungen hat. Bei Leitungswasser als Temperiermedium zeigen vor allem die mit Federn bestückten Probeplatten den größten Anteil an Ablagerungen (inkl. Totgebieten) im Schichtdickenbereich bis 0,6 mm. Das Helix-Mischelement führt

hingegen im Vergleich zu nichtbestückten Temperierkanälen zu einer geringfügigen Senkung der Ablagerungen. Beim Einsatz von behandeltem Prozesswasser hingegen zeigen die federbestückten Platten zwar einen größeren Anteil an Ablagerungen im 0,2 mm Schichtbereich, Ablagerungen mit einer Schichtdicke $> 0,2$ mm treten aber im Vergleich zum Betrieb mit Leitungswasser bei allen Probeplatten sehr reduziert auf, ein Einfluss der Bestückung der Temperierkanäle lässt sich nicht eindeutig nachweisen. Hier hat die Additivierung und Kontrolle des Prozesswassers einen größeren Einfluss.

Parallel zu den Versuchen an der TH Köln wurde durch den Industriepartner Jokey Plastik ein spezielles Werkzeug entwickelt, um systematisch Ablagerungseffekte im Produktionsbetrieb zu dokumentieren.

AP 7: Experimentelle Validierung im Praxiseinsatz

Die Validierung der Simulationsergebnisse sowie der Geometrien für die statischen Mischsystem erfolgte in gemeinsamen Versuchsreihen. Insgesamt wurden zahlreiche Untersuchungen zur Optimierung des Wärmeübergangs in Spritzgießwerkzeugen im Rahmen von Abschluss und Projektarbeiten durchgeführt (siehe auch 2.6 Veröffentlichung der Ergebnisse). Dabei lagen verschiedene Aspekte/Einflussgrößen im Fokus der Untersuchungen, wobei insbesondere die Methodik zur Beurteilung des Wärmeübergangs eine große Rolle spielte. Betrachtet wurden die Werkzeugwandtemperatur im Bereich der Kavität über im Werkzeug verbaute Temperatursensoren und die Oberflächentemperatur des Bauteils zum Zeitpunkt der Entformung über eine Infrarot-Kamera, die im Rahmen des Projektes beschafft wurde (InfraTec VarioCAM® HD research). Beides sind gängige Methoden, die auch in der Praxis zum Einsatz kommen. Da aus wissenschaftlicher Sicht die mittlere Entformungstemperatur für die Berechnung der Kühlzeit erforderlich ist, wurde im Rahmen einer Abschlussarbeit ein Kalorimeter entwickelt und zusätzlich bei einigen Versuchsreihen genutzt. Die Kalorimetrie ermöglicht es den gesamten Wärmefluss aus dem Bauteil vom Zeitpunkt der Entformung (Eintauchen in das Kalorimeter) bis zur kompletten Auskühlung zu detektieren. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 44 zu sehen. Abbildung 45 zeigt, dass die mittlere Entformungstemperatur bei gleicher Einstelltemperatur des Wassers deutlich niedriger liegt.

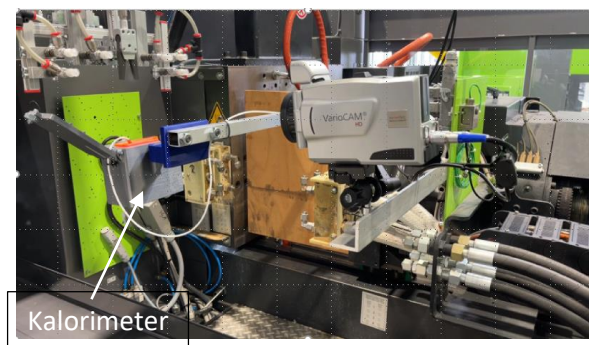


Abbildung 44: Versuchsaufbau für die Anwendung der IR-Kamera und des Kalorimeters

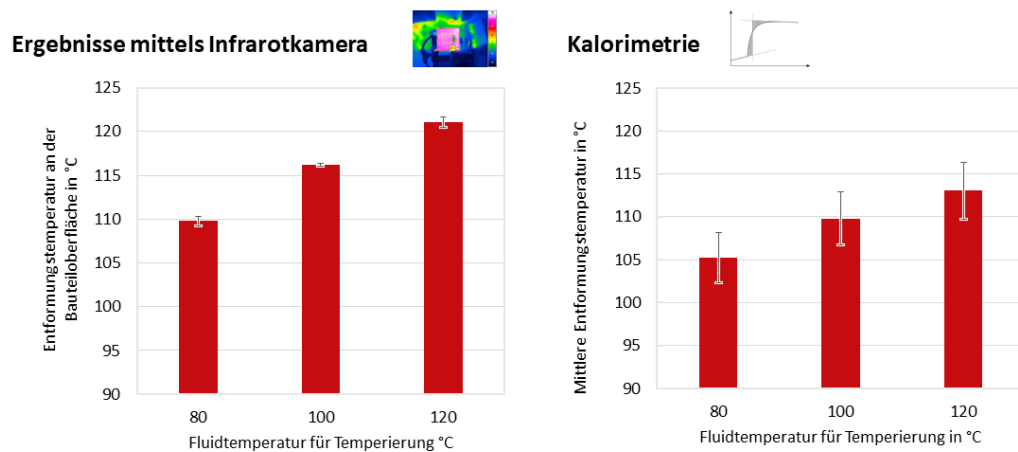


Abbildung 45: mittlere Entformungstemperatur an der Bauteiloberfläche mittels IR-Kamera (links) und mittlere Entformungstemperatur über Kalorimetrie (rechts), Campusplattengeometrie, Formeinsatz 1.2343 ESU

Weiterhin wurden im Rahmen des Projektes verschiedene grundlegende Temperierstrategien betrachtet. Während beim Standardspritzgießen das Temperiermedium konstant temperiert und kontinuierlich durch die Temperierkanäle gefördert wird, kommt zur Realisierbarkeit von Dünnwandbauteilen und Bauteilen mit hohen Obeflächenanforderungen (Strukturen, Hochglanzoberfläche etc.) zunehmend die dynamische Temperierung zum Tragen. Dabei wird das Spritzgießwerkzeug angepasst an die Prozessbedingungen bei der Formfüllung zunächst beheizt und danach gekühlt. Bei einer Realisierung durch Flüssigkeitstemperierung bedeutet dies, dass zwei getrennte Fluidkreisläufe mit je einer hohen und einer sehr niedrigen Temperatur im Wechsel geschaltet werden müssen. Dies ist sehr energieintensiv und führt in der Regel zu verlängerten Zykluszeiten im Prozess. Gerade für diesen Einsatzzweck wird bei einer Verbesserung des Wärmeübergangs durch den Einsatz von statischen Mischelementen ein großes Potential vermutet. In den Versuchsreihen wurden Wechseleinsätze mit Durchbruch in der Kontur eingesetzt und unter Verwendung der dynamischen Temperierung mittels statistischer Versuchsplanung der optimale Betriebspunkt bezüglich Temperaturen und Umschaltstrategien für die Qualität der Oberfläche (Sichtbarkeit der am Durchbruch erzeugten Bindenaht) bestimmt. Ausschlaggebend ist das Erreichen der Setting-Werkzeugwandtemperaturen (gemessene durch Sensorik im Werkzeug), die für die Freigaben der Spritzgießmaschine zum Einspritzen und Öffnen des Werkzeugs benötigt werden. Eine bessere Wärmeabfuhr aus dem Werkzeug mündet dabei in kürzeren Zykluszeiten. Das Versuchssetting wurde mit zwei Stahlqualitäten durchgeführt, einem wärmeleitfähigeren Warmarbeitsstahl des Typs HTCS-130 DC mit einer Wärmeleitfähigkeit von 60 W/(mK) und einem Stahl der Qualität 1.2343 ESU mit einer Wärmeleitfähigkeit von 25 W/(mK). Entgegen der Erwartungen, konnte beim 1.2343 ESU durch den Einsatz von Mischelementen aufgrund der hohen Standardabweichungen keine signifikante Zykluszeitverkürzung erzielt werden (siehe Abbildung 46). In Abbildung 47 sind im Vergleich die erzielten Zykluszeiten für den Hochleistungsstahl visualisiert. Hier ist bei der Betrachtung der Zykluszeit für den Hochleistungsstahl in Kombination mit den statischen Mischelementen ein kleiner Effekt erkennbar, wobei beim Einsatz der Federn eine geringfügig geringere Kühlzeit erzielt werden konnte.

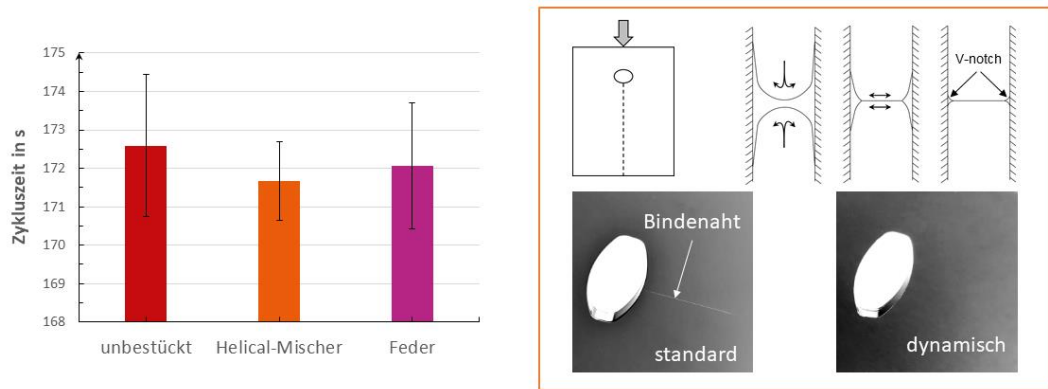


Abbildung 46: Zykluszeiten für eine Probenplatte mit Durchbruch für eine optimierte Oberflächenqualität unter Anwendung der dynamischen Temperierung und unter Einsatz von Mixchern im Vergleich zum unbestückten Temperierkanal; Stahlwerkstoff: 1.2343 ESU

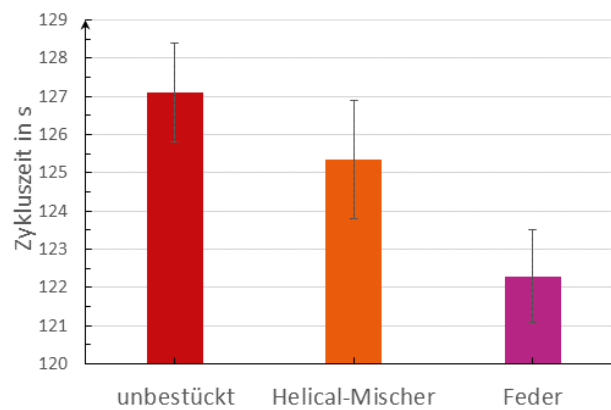


Abbildung 47: Zykluszeiten für eine Probenplatte mit Durchbruch für eine optimierte Oberflächenqualität unter Anwendung der dynamischen Temperierung und unter Einsatz von Mixchern im Vergleich zum unbestückten Temperierkanal; Stahlwerkstoff: HTC- 130 DC

Exemplarische Ergebnisse für die Untersuchungen im Standardtemperierprozess mit 1.2343 ESU und der Campusplatte ohne Durchbruch sind in Abbildung 48 visualisiert. Die mittlere Werkzeugwandtemperatur konnte durch den Einsatz von Helical-Mischern lediglich um 0,35 °C gesenkt werden und ist damit vernachlässigbar. Auf den resultierenden Volumenstrom des Temperiermediums hat die Bestückung jedoch einen ausgeprägten Effekt. Der Durchfluss reduziert sich von 6,2 l/min im unbestückten Temperierkanal um 0,3 l/min auf einen Wert von 5,9 l/min, wenn die Federn zur Anwendung kommen. Mit Helical-Mischern sinkt die Durchflussmenge auf einen Wert von 4,9 l/min. Damit werden Temperiergeräte mit einer größeren Pumpenleistung für den Prozess benötigt.

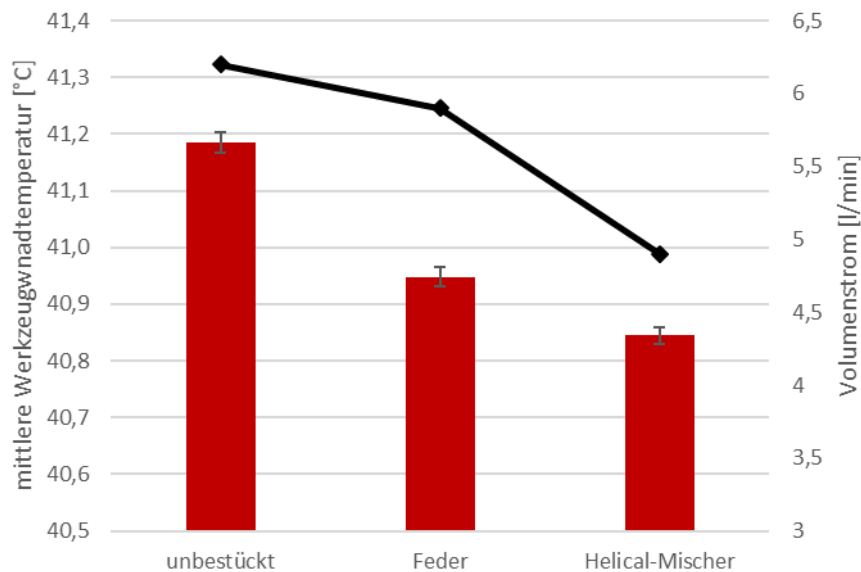


Abbildung 48: mittlere Werkzeugwandtemperatur für verschieden bestückte Temperierkanäle (rote Balken, linke y-Achse) und zugehöriger Volumenstrom des Temperiergerätes (schwarze Messdaten, rechte y-Achse)

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass in den Versuchsreihen mit dem modifizierten Campuswerkzeug, im Gegensatz zu den Vorversuchen, nicht die erhofften Verbesserungen in der Wärmeübertragung gezeigt werden konnten. In der Analyse und Auswertung der Ergebnisse war es jedoch möglich die Ursachen zu detektieren und Handlungsmaßnahmen für das Projekt zu definieren.

Der Forschungsansatz des Projektes besteht darin, die laminare Grenzschicht der Temperierkanalströmung mittels Mischelementen oder einer Pulsationsströmung zu stören und damit die Wärmeübertragung zu verbessern. Der Isoliereffekt der laminaren Grenzschicht wächst mit der Dicke der laminaren Grenzschicht (Δ) und ist sowohl von der Reynoldszahl (Re) als auch dem Temperierkanaldurchmesser (d) abhängig:

$$\Delta = \frac{12,64}{Re^{0,75}} \cdot d \quad (\text{Gl. 2})$$

Dieser Zusammenhang ist auch in Abbildung 49 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Grenzschichtdicke bei niedrigen Reynoldszahlen (Re) und großen Temperierkanaldurchmessern (d) besonders groß ist. Eine Störung der laminaren Grenzschicht führt dann zu vergleichsweise großen Verbesserungen (blauer Punkt, Vorversuche). Im verwendeten Spritzgießwerkzeug bildet sich allerdings eine vergleichsweise dünne laminare Grenzschicht. Bei den Optimierungen konnte daher keine Verbesserung der Wärmeübertragung erzielt werden.

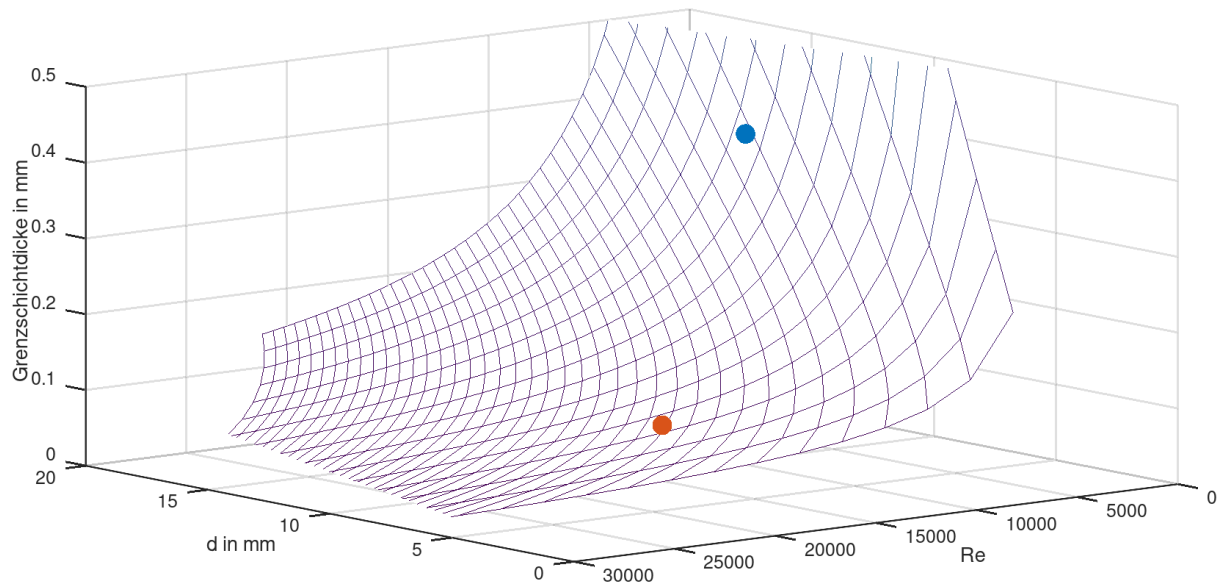


Abbildung 49: Darstellung der Grenzschichtdicke in Abhängigkeit vom Kanaldurchmesser d und der Reynoldszahl der Rohrströmung für den Vorversuch (blau) und für das im Projekt verwendete Spritzgießwerkzeug (rot).

Der zweite Aspekt ergibt sich aus dem zu übertragenden Wärmestrom an der Temperierkanalwand und hängt von der thermischen Prozessauslegung ab. Eine lange Zykluszeit führt zum Beispiel zu einem vergleichsweise geringen, mittleren Wärmestrom. Eine große Temperaturdifferenz zwischen Schmelzetemperatur und Werkzeugwandtemperatur führt beispielsweise zu großen übertragenen Wärmeströmen. Aus der Formel zur Berechnung des Wärmestroms bei der konvektiven Wärmeübertragung ergibt sich aus dem übertragenen Wärmestrom die Temperaturdifferenz an der Temperierkanalwand. Ein geringer Wärmestrom führt zu einer geringen Temperaturdifferenz bei der konvektiven Wärmeübertragung. Ergreift man jetzt Optimierungsmaßnahmen wie beispielsweise das Einbringen der Mischelemente, verbessert sich zwar der Wärmeübergangskoeffizient, die absolute Temperaturabsenkung fällt allerdings gering aus. Bei den Vorversuchen lag die Wärmestromdichte etwa um Faktor 5 höher als bei dem verwendeten Spritzgießwerkzeug. Höhere Wärmestromdichten konnten mit dem Versuchswerkzeug nicht realisiert werden.

Hohe Wärmestromdichten liegen beispielsweise in Bereichen von Materialansammlungen vor. Dort bilden sich so genannte Hotspots aus, welche zu hohen Formteilterperaturen und dadurch zu hohen Wärmestromdichten führen. Darüber hinaus, erzielen statische Mischelemente einen besonders hohen Effekt, wenn eine möglichst große Grenzschichtdicke vorliegt. Dies ist bei großen Temperierkanaldurchmessern und/oder geringen Reynoldszahlen der Fall.

Für den Praxistest an einem realen Bauteil wurde ein Spritzgießwerkzeug für einen Kunststoffclip ausgewählt, der ausgeprägte Materialansammlungen aufweist (Abbildung 50),



Abbildung 50: Kunststoffclip-Formteil zur praktischen Untersuchung des Einflusses von statischen Mischelementen zur Optimierung von Hotspots, welche durch Materialansammlungen (orange markiert) verursacht werden.

Im Abkühlverhalten äußern sich die Masseansammlungen als Hotspots mit Temperaturen, welche 60 bis 70 K über den Temperaturen der restlichen Formteilmbereiche liegen (Abbildung 51). Die Untersuchungen wurden mit der im Projekt beschafften Thermografiekamera durchgeführt. Für die Untersuchungen wurde die radiale Ansicht der Kunststoffclips gewählt, da der dort sichtbare Formteilmereich dem Temperierkanal zugewandt ist (Abbildung 52).

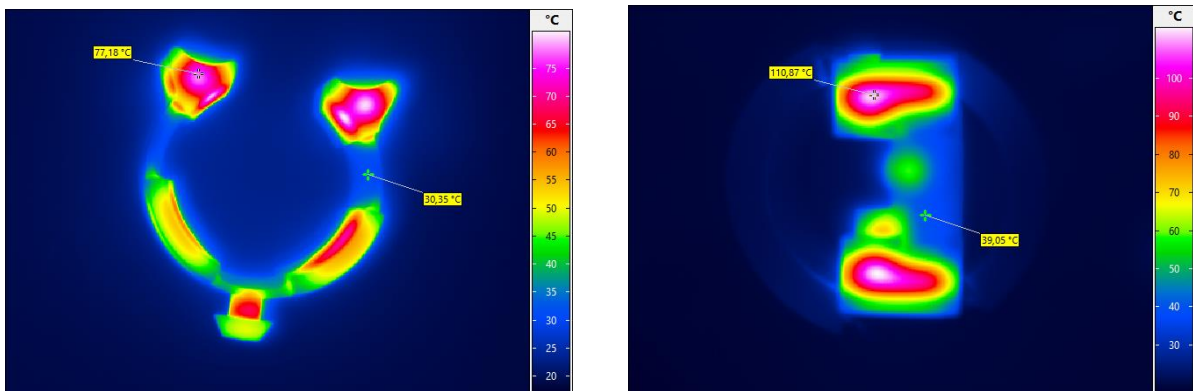


Abbildung 51: Thermografiebilder des Kunststoffclips nach der Entformung. Axiale Ansicht (links), radiale Ansicht (rechts).



Abbildung 52: Formeinsatz zur Herstellung von Rohrclips. Der Verlauf des Temperierkanals ist mit einer blauen Linie dargestellt. Der Formteilmereich der Masseansammlung (orange markiert) ist dem Temperierkanal zugewandt. Im Bild ist die Feder eines Teilkanals erkennbar.

Für die Untersuchung wurden die korrodierten Temperierkanäle des Spritzgießwerkzeugs zunächst gereinigt, um vergleichbare Ergebnisse zu erzielen. Die Spritzgießversuche wurden dann mit und ohne Federelementen im Temperierkanal durchgeführt. Die Helical-Mischelemente konnten mit dem vorliegenden Spritzgießwerkzeug nicht untersucht werden. Da sich diese Mischelemente im Vergleich zu Federn nur schwer demontieren lassen, müssen die Temperierkanäle als Durchgangsbohrungen ausgeführt sein. Dies ist im vorliegenden Spritzgießwerkzeug nicht der Fall.

Abbildung 53 stellt die Grenzschichtdicke für verschiedene betrachtete Versuche dar. Im Vorversuch lag eine vergleichsweise dicke Grenzschicht vor, welche zu einem starken Effekt von Mischelementen führte (blauer Arbeitspunkt). Im Spritzgießwerkzeugeinsatz für die Campusplatte, welches im Projekt beschafft wurde, lag nur eine geringe Grenzschichtdicke vor (roter Arbeitspunkt). Mit diesem Werkzeug konnte kein Effekt der Mischelemente nachgewiesen werden. Da das vorliegende Kunststoffclip-Werkzeug einen Temperierkanaldurchmesser von nur 6 mm aufweist, wurde der Durchfluss entsprechend niedrig gewählt ($Re \approx 2.200$), um eine höhere Grenzschichtdicke zu erzielen, als im Projektwerkzeug (schwarzer Arbeitspunkt).

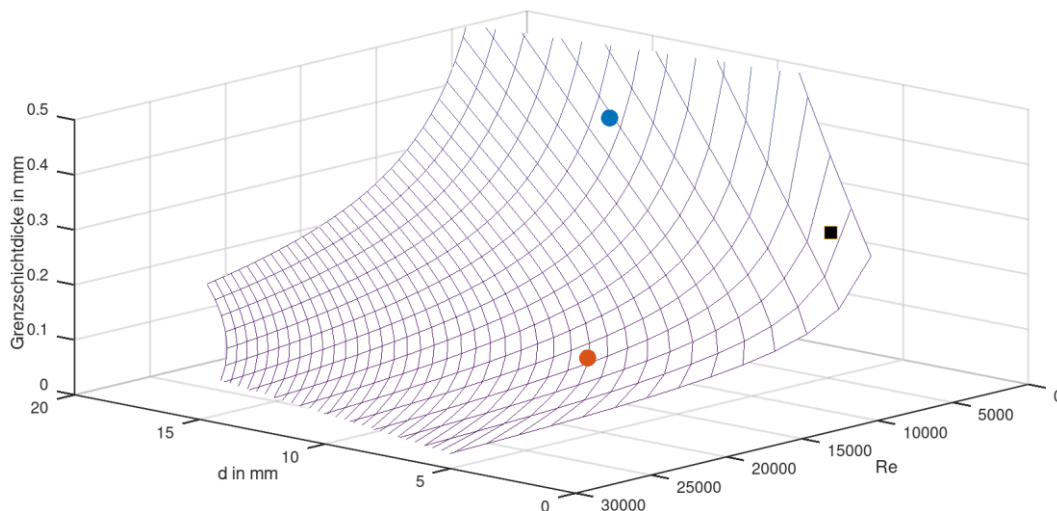


Abbildung 53: Grenzschichtdicke im Temperierkanal für verschiedene betrachtete Spritzgießprozesse. Vorversuch (blau), Versuchswerkzeug im Projekt (rot), vorliegendes Rohrclip-Werkzeug (schwarz).

Bei der Durchführung der Versuche wurde die Bildaufnahme an der Thermografiekamera immer zu Beginn der Auswerferbewegung gestartet. So war sichergestellt, dass die Aufnahmen mit guter Reproduzierbarkeit ausgewertet werden konnten. Es wurde das Thermografiebild 6 Sekunden nach der Entformung des Formteils ausgewertet. Diese 6 Sekunden wurden benötigt, um die Formteile im Aufnahmebereich der Thermografiekamera zu positionieren. Die statischen Mischelemente verursachen einen zusätzlichen Druckverlust und führen bei der verwendeten Pumpe mit konstanter Drehzahl zu einem niedrigeren Durchfluss im Vergleich zum leeren Temperierkanal. Um diesen Effekt zu berücksichtigen, wurde der Versuch zunächst mit dem leeren Temperierkanal durchgeführt und der angestrebte Durchfluss eingestellt. Nach der Versuchsreihe wurden dann die Federn in den Temperierkanal bei unveränderter Ventilstellung eingebracht. Bei Verwendung der Federn ergab sich also ein reduzierter Durchfluss.

Abbildung 54 zeigt die Aufnahmen von Formteilen bei leerem Temperierkanal (links) und bei optimierter Strömung durch Verwendung einer Feder (rechts). Es wurden jeweils 5 Versuche durchgeführt.

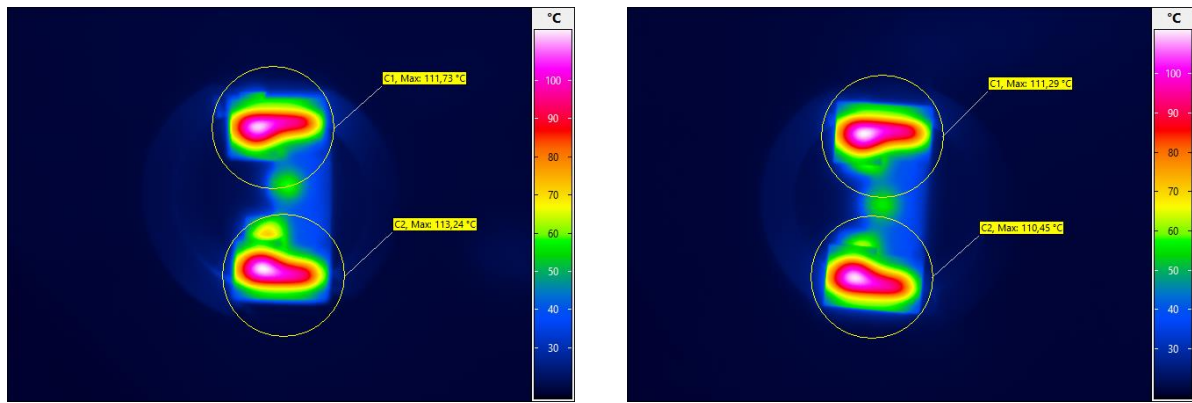


Abbildung 54: Thermografieaufnahmen des Rohrclips 6 Sekunden nach der Entformung. Leere Temperierkanäle (links) und Temperierkanäle mit Federn (rechts) im Vergleich. Am unteren Hotspot ist eine deutliche Absenkung der Temperatur zu erkennen.

Die ausgewerteten Temperaturen der Formteile sind in Abbildung 55 dargestellt. Bei der Prozesseinstellung ohne Federn ist zu beobachten, dass der obere Hotspot eine niedrigere Temperatur aufweist, als der untere Hotspot. Dies ist auf die Lage der Masseansammlungen im Bezug zum Temperierkanal zurückzuführen. Der Temperierkanal liegt im Bereich des oberen Hotspots hinter einer 90°-Umlenkung. Da diese Umlenkung aus 2 rechtwinkligen Bohrungen besteht, ist diese Umlenkung sehr scharf und führt hinter der Umlenkung zu einem hohen Turbulenzgrad mit einer geringen laminaren Grenzschicht. Diese bildet sich im weiteren Verlauf der Temperierbohrung aus und hat offenbar im Bereich des unteren Hotspots eine relevante Grenzschichtdicke erreicht. Im Bereich des oberen Hotspots ist die Isolierungswirkung der Grenzschicht relativ gering. Dementsprechend ist das Optimierungspotenzial am unteren Hotspot größer als am oberen Hotspot. Es ist zu erkennen, dass die Temperatur des unteren Hotspots um etwa 2,5 K abgesenkt werden kann. Die Temperatur des oberen Hotspots ändert sich dagegen nur um 0,8 K. Diese Absenkung bietet die Möglichkeit eine kürzere Kühlzeit zu erzielen oder bei gleicher Kühlzeit das Schwindungspotenzial zu reduzieren. Darüber hinaus führen die Federn zu einem gleichmäßigeren Temperaturniveau der Hotspots. Daher ist davon auszugehen, dass die Schwindung der beiden Formteilmbereiche gleichmäßiger verläuft und somit zu weniger Verzug des Formteils führt.

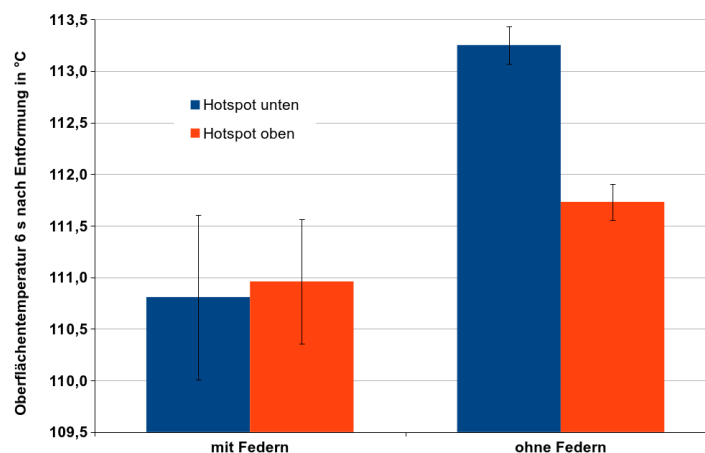


Abbildung 55: Mittelwerte der gemessenen Oberflächentemperaturen 6 Sekunden nach Entformung. Die Fehlerbalken stellen die Standardabweichung dar.

Mit den Projektpartnern wurden typische, praxisrelevante Wärmestromdichten ermittelt. Dabei zeigte sich, dass Wärmestromdichten und Grenzschichtdicken wie in den Vorversuchen durchaus in der Praxis auftreten. Allerdings können ebenso Bedingungen vorherrschen, welche keine Optimierung des Wärmeübergangs erlauben. Die untersuchten Optimierungsmaßnahmen können daher nicht pauschal

in allen Spritzgießprozessen eingesetzt werden. Eine Praxisanwendung, für die sich der Einsatz von statischen Mischern lohnt, ist im Falle von Masseanhäufungen in Bauteilen, die dann zu Hotspots im Werkzeug/Bauteil führen. Masseanhäufungen lassen sich bedingt durch die funktionelle Anwendung von Produkten häufig nicht vermeiden und treten auch bei Produkten des Projektpartners Jokey auf.

AP 8: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und Marketingkonzept

Die Beschreibung des AP8 (**Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und Marketingkonzept**) erfolgt an dieser Stelle in komprimierter Form. Ein ausführlicher Bericht zu der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und dem Marketingkonzept ist als Anlage beigefügt.

Beschreibung des Ablaufs und Zuständigkeit

Der erste Punkt des Arbeitspaketes „AP 8“ bei der Optimierung des Wärmeübergangs in Temperiersystemen zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit (OptiTemp) beinhaltet die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung. Das Ziel ist die wirtschaftliche Vorteilhaftigkeit der in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern erarbeiteten Optimierungskonzepte zu berechnen. Zu diesem Themenkomplex wurde eine Bachelorarbeit von Sergio Ouano, einem Studenten im Bereich Wirtschaftsingenieurwesens, erstellt. Victoria Maier, eine Studentin im Masterstudiengang Wirtschaftsingenieurwesen, hat als wissenschaftliche Hilfskraft für OptiTemp sowohl im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung also auch beim Marketingkonzept die Ergebnisse konkretisiert und zusammengetragen. Aufgrund fehlender Daten wurde statt einer Durchführung von statischen und dynamischen Verfahren ein Kalkulationsschema zur Ermittlung der Herstellkosten entwickelt, um den Einfluss des optimierten Verfahrens auf die Herstellkosten abbilden zu können.

Kalkulationsschema

Zur Berechnung der Herstellkosten werden im Kalkulationsschema zunächst die Maschinenkosten in Form des Maschinenstundensatzes ermittelt. Es werden für die Abschreibung, die Zinskosten, die Miete, die Kühlung, die Instandhaltung und den Strom die Kosten, die pro Stunde anfallen, berechnet. Für die weitere Ermittlung der Herstellkosten kommen die Werkzeugkosten, die Lohnkosten sowie die Materialkosten hinzu. Zudem werden die Temperierkosten, die separat ebenfalls in Form eines Maschinenstundensatzes ermittelt werden, mit in die Berechnung der Herstellkosten einbezogen. Zusammenfassend ergeben sich die gesamten Herstellkosten, die pro Stunde anfallen. Des Weiteren können mit Hilfe des Kalkulationsschemas die Herstellkosten pro Stück berechnet werden.

Effekte OptiTemp auf Herstellkosten

Zum einen können durch OptiTemp die Energiekosten reduziert werden (Abbildung 56). Auch der Stundensatz des Temperiergerätes (Werkzeugtemperierung) kann durch den verbesserten Wärmeübergang im Temperierkanal gesenkt werden, sodass insgesamt die Herstellkosten sinken. Ein weiterer Effekt ist die Reduzierung der Zykluszeit durch die Verkürzung der Kühlzeit. Dies führt dazu, dass die Stückanzahl pro Stunde sowie pro Tag erhöht wird.

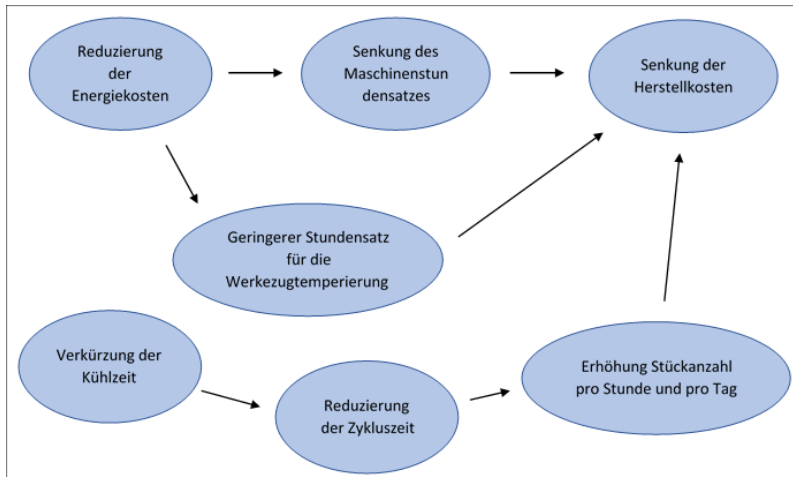


Abbildung 56: Positive Effekte OptiTemp auf Kosten

Zum anderen ist OptiTemp mit höheren Werkzeug-, Wartungs- und Reparaturkosten verbunden (Abbildung 57). Das Temperiergerät, das für mehr Druckaufbau nötig ist, verursacht ebenso höhere Kosten. Zudem kann der Einbau von einem hochwertigen Stahl höhere Investitionen erfordern. Hierbei muss ebenfalls die Werkzeuglebensdauer abgeschätzt werden. Es ist fraglich und zu überprüfen, ob die Verwendung der Mischelemente von STRIKO Verfahrenstechnik GmbH mit einem erhöhten Stromverbrauch einhergeht.

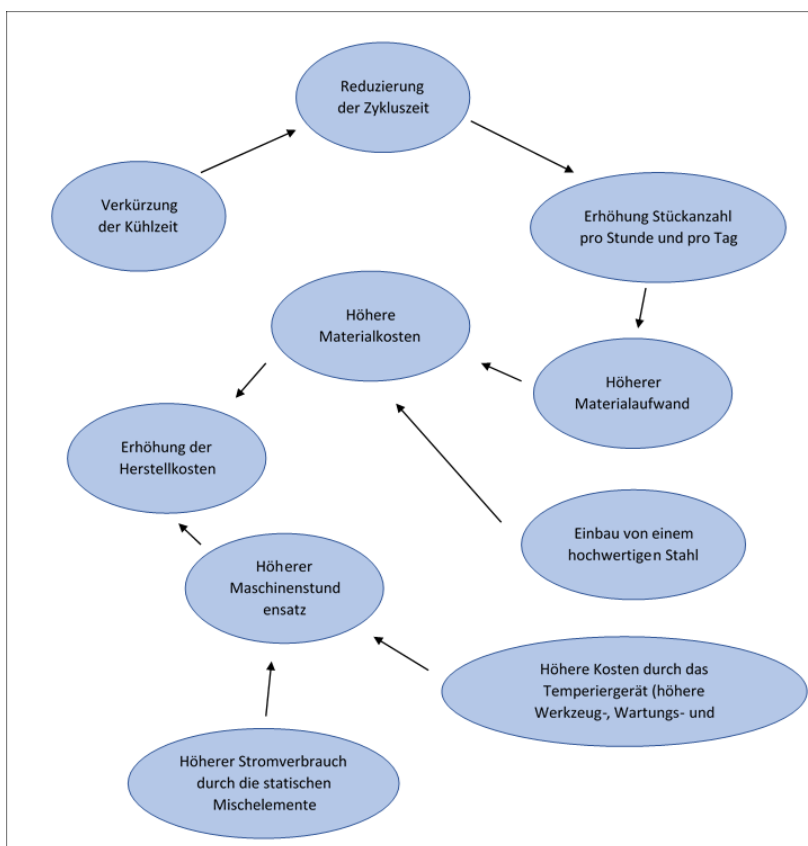


Abbildung 57: Negative Effekte von OptiTemp auf Kosten

Marketingkonzept

Nach der erfolgten Analyse zur Wirtschaftlichkeit wird ein Marketingkonzept erarbeitet, welches die Vermarktung der neuen Technologie zum Inhalt hat. Im Rahmen einer Mark- und Wettbewerbsanalyse wird das Marktpotenzial abgeschätzt, potenzielle Wettbewerber identifiziert um anschließend eine Markteintrittsstrategie erarbeitet. Diese enthält neben den 4P des Marketingmix (product, place, price, promotion) eine SWOT-Analyse, in der die Risiken und Chancen den Stärken und Schwächen der neuen Technologie gegenübergestellt werden. Die SWOT Analyse ist in Abbildung 13 des angehängten Berichts zu sehen.

2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Der genehmigte Projektkostenrahmen setzte sich in etwa zu 1/2 aus Personalkosten und zu 1/2 aus Sach-, Investitions- sowie Verwaltungskosten zusammen. Der zahlenmäßige Nachweis der von der Hochschule zu verausgabenden Mitteln geht dem Projektträger direkt aus der Verwaltung der Technischen Hochschule Köln zu.

Von den Industrieprojektpartnern sind Kosten für die Fertigung von statischen Mischelementen und der Softwarebereitstellung übernommen worden. Zudem sind den Projektpartnern weitere, nicht zu beziffernde Ausgaben entstanden, die durch Besuche von Projektmeetings entstanden sind.

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Der Projektverlauf orientierte sich an den mit den Projektpartnern im Antrag festgelegten Projektablaufplan. Durch die folgenden Punkte sind Abweichungen im Projektablauf entstanden:

- Die Einstellung der beiden wissenschaftlichen Mitarbeiter konnte erst zum 01.12.2019 und 01.01.2020 erfolgen.
- Durch einen personellen Wechsel innerhalb der Projektlaufzeit blieb eine Position eines wissenschaftlichen Mitarbeiters für einen Zeitraum von 2,5 Monaten vakant.
- Die Corona Pandemie erschwerten die Beschaffungen und den Laborbetrieb.
- Personalfuktuation und deren Neubesetzungen.

Diese Punkte machten eine Projektlaufzeitverlängerung notwendig und konnte kostenneutral realisiert werden. Durch erschwerte Beschaffung während der Corona-Pandemie bedingt durch lange Lieferzeiten, konnten die Versuche mit dem Pulsator erst zu einem späteren Zeitpunkt gestartet und für den Projektfortschritt benötigte Modifizierungen an der Hardware nicht mehr innerhalb der Projektlaufzeit realisiert werden. Projektthemen die zum 31.03.2023 noch nicht vollständig abgeschlossen sind werden von den Projektpartnern auch über das Projektende hinaus weiterverfolgt.

2.4 Voraussichtlicher Nutzen der Ergebnisse des Vorhabens

Durch das FHprofUnt-Projekt „OptiTemp“ konnte gezeigt werden, dass der Einsatz Mischelementen im Praxiseinsatz insbesondere für Bauteilen mit Masseanhäufungen zu einer Verbesserung des Wärmeübergangs- führen kann. Die Praxisversuche am Ablagerungsversuchsstand haben gezeigt, dass die Additivierung und Kontrolle des Prozesswassers einen größeren Einfluss auf die Bildung von Ablagerungen/Fouling als die Bestückung der Temperierkanäle mit statischen Mischern hat. Die

Pulsation hat nach wie vor viel Potential, gerade im Hinblick auf automatisierte Reinigungsprozesse während der Produktion.

Vor allem die numerische Modellierung des Vorgangs ermöglicht es, eine sehr gute Vorauslegung durchzuführen, um diese später im fertigungstechnischen Bereich gezielt einsetzen und für den Einsatz von statischen Mischern geeignete Bauteil/Werkzeugsituationen auswählen zu können.

Der Nutzen liegt hierbei primär in der Auslegung und Konstruktion der Werkzeuge sowie in der Spritzgießsimulation. Die Anwender können durch die Ergebnisse schon während der Projektierung die mögliche Verbesserung abschätzen und somit die Entwicklungs- und später die Zykluszeit verbessern.

Darüber hinaus lassen sich die Projektergebnisse auf andere Industriezweige übertragen, die mit Wärmeübertragungsmechanismen durch Fluidströmungen arbeiten. Als Beispiel sind hier Fußbodenheizungen oder Maschinenkühlungen zu nennen.

2.5 Fortschritt auf dem Gebiet bei anderen Stellen

Ein Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen ist nicht bekannt. Die Entwicklung der Projekthinhalte wurde bisher ausschließlich in diesem Projekt verfolgt.

2.6 Veröffentlichung der Ergebnisse

Artikel/Tagungsbände

- Stricker, M.; Lake, S. (2020): Coole Typen für eine effiziente Werkzeugtemperierung: Wirtschaftlichkeitspotenzial: Spritzgießwerkzeuge aus Stählen mit hoher Wärmeleitfähigkeit. In: Kunststoffe : Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung., S. 27 - 29.
- Anders, D., Baum, M. and Alken, J. (2021): A Comparative Study of Numerical Simulation Strategies in Injection Molding. WCCM-ECCOMAS2020

Artikel (peer-reviewed)

- Baum, M.; Anders, D. (2021): A numerical simulation study of mold filling in the injection molding process. Computer Methods in Materials Science, 21(1): 25-34.
- Baum, M.; Jasser, F.; Stricker, M.; Anders, D. Lake, S. (2022): Numerical Simulation of the Mold Filling Process and its Experimental Validation. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.
- Anders, D.; Reinicke, U.; Baum, M. (2023): Analysis of heat transfer enhancement due to helical static mixing elements inside cooling channels in machine tools. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology
- Jasser, F.; Stricker, M.; Lake, S.; Kurz, F. (2023): Improved Heat Transfer for fluid-based dynamic temperature controlled injection molds. Proceedings of the 36th Conference of the Polymer Processing Society – PPS 36, peer-reviewed Conference Proceedings.
- Jasser, F.; Stricker, M.; Lake, S. (2023): Optimized heat transfer in injection molds and its influence on demolding temperature and part quality, Proceedings of the 37th Conference of the Polymer Processing Society – PPS 37, peer-reviewed Conference Proceedings, akzeptiert, noch nicht veröffentlicht.

- Stricker, M.; Jasser, F.; Lake, S. (2023): Optimization of heat transfer in injection molds and its impact on process efficiency and part quality. Proceedings of the 2nd International Symposium on Plastics Technology, peer-reviewed Conference Proceedings, akzeptiert, noch nicht veröffentlicht.

Konferenzbeiträge

- Anders, D. (2021): A comparative study of numerical simulation strategies in injection molding. 14th World Congress in Computational Mechanics, Paris, 11.-15.01.2021.
- Baum, M. (2021): A numerical simulation study of mold filling in the injection molding process. XXVII Conference on Computer Methods in Materials Technology, Krakow, 08.-09.03.2021.
- Anders, D.; Reinicke, U.; Baum, M. (2023): Untersuchung der Wärmeübergangsintensivierung mit Hilfe statischer Mischer in wassergekühlten Werkzeugen. 12. Anwendertreffen SAXSIM (SAXon Simulation Meeting), Technische Universität Chemnitz, 07.03.2023.
- Jasser, Fabian; Stricker, Michael; Lake, Simone; Kurz, Fabian (2021): Improved Heat Transfer for Fluid-Based Dynamic Temperature Controlled Injection Molds, 36th Conference of the Polymer Processing Society; Montreal, Canada; 26.09.-29.09.2021
- Jasser, F.; Stricker, M.; Lake, S. (2022): Optimized heat transfer in injection molds and its influence on demolding temperature and part quality, Proceedings of the 37th Conference of the Polymer Processing Society – PPS 37, Fukuoka, Japan, 11.4-15.4.2022
- Stricker, M.; Jasser, F.; Lake, S. (2022): Optimization of heat transfer in injection molds and its impact on process efficiency and part quality. 2nd International Symposium on Plastics Technology, Conference of the Polymer Processing Society, Aachen, 5.09-6.09.2022
- Lake, S. (2021): Dynamische Temperierung für thermoplastische Spritzgießteile – Optimierung von Bindehaftqualität und Herstellkosten. 24. Engelskirchener Kunststoff-Technologie-Tage, Lindlar, 17.-18.06.2021.
- Lake, S. (2022): Mehr Effizienz beim Spritzgießen durch den Einsatz hochwärmeleitfähiger Stähle. 25. Engelskirchener Kunststoff-Technologie-Tage, Lindlar, 2022.

Studentische Projekt- und Abschlussarbeiten

- Christian Wolfslat, Bachelorarbeit: Entwicklung eines Teststands zur Optimierung des Wärmeübergangs in Rohrströmungen durch den Einsatz von statischen Mischern. Technische Hochschule Köln; 01/2020.
- Sandra Wipperfeld, Masterprojekt: Messtechnische Validierung von Wärmeübergangsmechanismen an statischen Mischern. Technische Hochschule Köln; 02/2021.
- Sandra Wipperfeld, Masterprojekt: Experimentelle und numerische Ableitung von Nußeltkorrelationen für statische Mischelemente. Technische Hochschule Köln; 03/2021.
- Sergio Ouano, Bachelorarbeit: Untersuchung der finanziellen Vorteilhaftigkeit für Kunststofffertigungsverfahren des vom Forschungsprojekt OptiTemp veränderten Fertigungsverfahrens zum Spritzgießen. Technische Hochschule Köln; 08/2022.
- Martin Schult, Bachelorarbeit: Optimierung des dynamischen Temperierprozesses beim Spritzgießen unter Berücksichtigung von Bauteilqualität und Wirtschaftlichkeit. Technische Hochschule Köln, 10/2020.
- Andre Kilian, Bachelorarbeit: Einfluss statischer Mischelemente im Temperierkanal auf das thermische Verhalten von Spritzgießwerkzeugen bei dynamischer Temperierung. Technische Hochschule Köln, 07/2021.

- Ingo Kuhli-Lauenstein, Bachelorarbeit: Analyse der Wärmeübertragung eines Spritzgießwerkzeugs unter der Verwendung statischer Mischelemente im Temperierkanal. Technische Hochschule Köln, 07/2021.
- Georgios Sahinidis, Bachelorarbeit: Entwicklung eines Kalorimeters zur Messung der mittleren Entformungstemperatur im Spritzgießprozess. Technische Hochschule Köln, 08/2021.
- Andre Radtke, Bachelorarbeit: Einfluss von hochwärmeleitfähigen Werkzeugstählen auf die Formteilqualität beim Spritzgießen teilkristalliner Thermoplaste. Technische Hochschule Köln, 05/2021.
- Tobias Schumacher, Praxissemester: Untersuchung von Verunreinigungen und deren Auswirkungen in Temperiersystemen sowie Möglichkeiten zur Entfernung der Verunreinigungen. Technische Hochschule Köln, 05/2021.
- Malte Kilkowski, Bachelorarbeit: Untersuchung von Ablagerungs- und Korrosionsprozessen in Temperiersystemen, Technische Hochschule Köln, 03/2022.
- David Maciag, Bachelorarbeit: Einfluss optimierter Werkzeugtemperierung auf die mittlere Entformungstemperatur und auf die Oberflächenqualität im Spritzgießprozess. Technische Hochschule Köln, 10/2022.

3. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Zeitplan und Arbeitspakete des Projekts	3
Abbildung 2: Schematisches Konzept für den Pulsationsvorversuch.....	9
Abbildung 3: Erster Versuchsaufbau zur Pulsationsströmung	10
Abbildung 4: Konzepte zur Umsetzung der Pulsationstechnik. a) Grundkonzept zum Induzieren einer Pulsation in eine durchströmte Messstrecke. b) Weiterentwickeltes Konzept.	10
Abbildung 5: optimierter Pulsationsversuchsstand	11
Abbildung 6: Umgebaute Rohrstrecke mit Messingrohr, Thermoelementen, digitalen Differenzdruckmesssystemen, Datenlogger und geregelterm Heizelement.	12
Abbildung 7: Schematischer Aufbau (nicht maßstabsgetreu) mit nummerierten Sensorpositionen...	13
Abbildung 8: Rechenmodell - System mit Anfangs- und Randbedingungen	14
Abbildung 9: Temperaturverteilung in der Werkzeugwand (Kontaktfläche Werkzeug zu Schmelze)..	14
Abbildung 10: Umgebaute Rohrmessstrecke mit LIF-System (Laserkopf mit Lichtschnittoptik und Kamera)	15
Abbildung 11: Temperaturverteilung im Rohrquerschnitt ($Re=5800$) - links: Rohr ohne Mischer, rechts: Rohr mit Mischer	16
Abbildung 12: Temperaturverteilung im Rohrquerschnitt ($Re=9700$) - Rohr ohne Mischer	16
Abbildung 13: Mittlere Temperatur der Kunststoffschmelze über 15 Zyklen bei Kühlkanal mit und ohne Mischer (links) rechts: Ausschnitt am Ende des 15 Zyklus	16
Abbildung 14: Berechnung der verschiedenen Arbeitspunkte als Schnittpunkt von Rohrnetz- und Pumpenkennlinie.....	17
Abbildung 15: Berechnungsmodell mit Anfangs- und Randbedingungen (l.) – Mischergeometrie und Anordnung (r.)	18
Abbildung 16: Maximale und Minimale Temperatur in der Kontaktfläche Schmelze-Werkzeug (Vergleich transiente vs. stationäre Berechnung).....	19
Abbildung 17: Differenz zwischen Vor- und Rücklauftemperatur am Outlet (Vergleich transiente vs. stationäre Berechnung).....	19
Abbildung 18: : Vergleich Rechnung – analytische Lösung bei 13400 W/m^2	20
Abbildung 19: Homogenisierungsmaß - Quotient aus flächen- und massestrom-gewichteter mittlerer Temperaturdifferenz am Outlet	20
Abbildung 20: Kontaktflächentemperatur – normiert auf den Wert der jeweiligen Variante bei $1,21 \text{ m/s}$	21
Abbildung 21: Kontaktflächentemperatur bezogen auf den Wert des leeren Kanals bei der jeweiligen Geschwindigkeit	22
Abbildung 22: Bezogene Temperatur in der Kontaktfläche bei verschiedenen Wärmestromdichten ($v = 1,21 \text{ m/s}$)	22
Abbildung 23: Bezogene Temperatur in der Kontaktfläche bei verschiedenen Wärmestromdichten ($v = 0,5 \text{ m/s}$).....	23
Abbildung 24: Bezogene Temperatur in der Kontaktfläche bei verschiedenen Wärmestromdichten ($v = 6 \text{ m/s}$).....	23
Abbildung 25: Normierte Temperatur in der Kontaktfläche bei verschiedenen Wärmeleitfähigkeit für den leeren Kühlkanal.....	23
Abbildung 26: Normierte Temperatur in der Kontaktfläche bei verschiedenen Wärmeleitfähigkeit für verschiedene Konfigurationen	24
Abbildung 27: Temperaturprofil am Outlet ($1,21 \text{ m/s}$; 60000 W/m^2) – ohne Mischer links und mit 13 Mischern rechts.....	24

Abbildung 28: Schmelzetemperatur nach 15 Zyklen (á 20s) für Leerrohr und 7 Mischer-Variante bei verschiedenen Geschwindigkeiten.....	25
Abbildung 29: Untersuchte Pulsationsströmungen zur Grundströmung 1,21m/s	26
Abbildung 30: Zeitlicher Verlauf der Manteltemperatur in Kelvin.....	26
Abbildung 31: Homogenisierungsmaß für 3 ausgewählte Varianten	27
Abbildung 32: Manteltemperatur für verschiedene Varianten bei einer Grundströmungsgeschwindigkeit von 0,5m/s	27
Abbildung 33: Homogenisierungsmaß für die Varianten mit 0,5m/s Grundfließgeschwindigkeit	28
Abbildung 34: Temperaturprofil am Outlet für konstante Fließgeschwindigkeit von 0,5m/s (links) und sinusförmiger Pulsationsströmung mit 0,25m/s Amplitude bei 20Hz	28
Abbildung 35: Wechseleinsatz für Versuchswerkzeug; links: Wechseleinsatz mit Tunnelanschnitt und Konturdurchbruch in der Probenplatte in Anlehnung an DIN EN ISO 294-3:2003 (D); Typ D2, rechts: Temperierkanallayout (orange: Schatten Plattengeometrie, blau: Fließweg Fluid, grau: Dichtstopfen)	29
Abbildung 36: Ins Spritzgießwerkzeug integrierte statische Mischelemente, links: Einbausituation an der Spritzgießmaschine, rechts: Temperierlayout mit statischen Mixern und Referenzkavität (orange: Schatten Plattengeometrie, rot: statische Mischer, blau: Fließweg Fluid, grau: Dichtstopfen, schwarz: Schraubverschlüsse)	30
Abbildung 37: Abhängigkeit der mittleren Temperatur (links) und des Druckverlusts von der Wendelung des Mixers	30
Abbildung 38: Versuchsstand für Langzeitmessung der Ablagerungseffekte.....	32
Abbildung 39: Temperierplatten mit Mischelementen (links: Feder, rechts: Helical-Mischelement)..	32
Abbildung 40: Einzelmessung an einer Prüfplatte des Ablagerungsprüfstandes mit dem konfokalen 3D-Laserscanning Mikroskop	33
Abbildung 41: Langzeituntersuchung von Ablagerungseffekten: Rauigkeitsmessungen mit 5-facher Vergrößerung (Mittelwerte über 7 Messpunkte der Platten 1-6 mit Standardabweichung	33
Abbildung 42: 3D-Vermessung der Ablagerungsplatten mit verschieden bestückten Temperierkanälen (Skalierung 0,2 mm)	34
Abbildung 43: 3D-Vermessung der Ablagerungsplatten mit verschieden bestückten Temperierkanälen (Skalierung 0,6 mm)	34
Abbildung 44: Versuchssetting für die Anwendung der IR-Kamera und des Kalorimeters	35
Abbildung 45: mittlere Entformungstemperatur an der Bauteiloberfläche mittels IR-Kamera (links) und mittlere Entformungstemperatur über Kalorimetrie (rechts), Campusplattengeometrie, Formeinsatz 1.2343 ESU.....	36
Abbildung 46: Zykluszeiten für eine Probenplatte mit Durchbruch für eine optimierte Oberflächenqualität unter Anwendung der dynamischen Temperierung und unter Einsatz von Mixern im Vergleich zum unbestückten Temperierkanal; Stahlwerkstoff: 1.2343 ESU.....	37
Abbildung 47: Zykluszeiten für eine Probenplatte mit Durchbruch für eine optimierte Oberflächenqualität unter Anwendung der dynamischen Temperierung und unter Einsatz von Mixern im Vergleich zum unbestückten Temperierkanal; Stahlwerkstoff: HTC- 130 DC.....	37
Abbildung 48: mittlere Werkzeugwandtemperatur für verschieden bestückte Temperierkanäle (rote Balken, linke y-Achse) und zugehöriger Volumenstrom des Temperiergerätes (schwarze Messdaten, rechte y-Achse)	38
Abbildung 49: Darstellung der Grenzschichtdicke in Abhängigkeit vom Kanaldurchmesser d und der Reynoldszahl der Rohrströmung für den Vorversuch (blau) und für das im Projekt verwendete Spritzgießwerkzeug (rot).	39

Abbildung 50: Kunststoffclip-Formteil zur praktischen Untersuchung des Einflusses von statischen Mischelementen zur Optimierung von Hotspots, welche durch Materialansammlungen (orange markiert) verursacht werden.	40
Abbildung 51: Thermografiebilder des Kunststoffclips nach der Entformung. Axiale Ansicht (links), radiale Ansicht (rechts).	40
Abbildung 52: Formeinsatz zur Herstellung von Rohrclips. Der Verlauf des Temperierkanals ist mit einer blauen Linie dargestellt. Der Formteilbereich der Masseansammlung (orange markiert) ist dem Temperierkanal zugewandt. Im Bild ist die Feder eines Teilkanals erkennbar.	40
Abbildung 53: Grenzsichtdicke im Temperierkanal für verschiedene betrachtete Spritzgießprozesse. Vorversuch (blau), Versuchswerkzeug im Projekt (rot), vorliegendes Rohrclip-Werkzeug (schwarz)..	41
Abbildung 54: Thermografieaufnahmen des Rohrclips 6 Sekunden nach der Entformung. Leere Temperierkanäle (links) und Temperierkanälen mit Federn (rechts) im Vergleich. Am unteren Hotspot ist eine deutliche Absenkung der Temperatur zu erkennen.	42
Abbildung 55: Mittelwerte der gemessenen Oberflächentemperaturen 6 Sekunden nach Entformung. Die Fehlerbalken stellen die Standardabweichung dar.	42
Abbildung 56: Positive Effekte OptiTemp auf Kosten.	44
Abbildung 57: Negative Effekte von OptiTemp auf Kosten.	44

4. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Materialdaten	18
--------------------------------	----

5. Literaturverzeichnis

- [BD2017] Berk, J. und DeMarzo, P.: Corporate Finance, Global edition, 4th edition, Pearson, Harlow, 2017.
- [Berg1999] Bergles, A.: Enhanced heat transfer: endless frontier, or mature and routine?. In: Enhanced Heat Transfer 6 (1999), S. 79–88.
- [Berg2014] Bergles, A.: Augmentation Of Heat Transfer, Single Phase. <http://www.thermopedia.com/content/574/> (besucht am 17. Juli 2014).
- [BM2013] Bergles, A. E. und Manglik, R. M.: „Current progress and new developments in enhanced heat and mass transfer“. In: Enhanced Heat Transfer 20 (2013), S. 1–15.
- [Boxl2011] Boxler, C.: Einsatz pulsierender Strömung zur Verbesserung des Foulingverhaltens an wärmeübertragenden Flächen in der milchverarbeitenden Industrie. Forschungsbericht, Institut für Chemische und Thermische Verfahrenstechnik der Technischen Universität Braunschweig. Braunschweig, 2011.
- [GLVP2014] Ghanem, A.; Lemenand, T.; Della Valle, D.; Hassan, P.: Static mixers: Mechanisms, applications and characterization methods, Chemical Engineering Research and Design, 2014.
- [HFN+2016] Hopmann, C.; Filz, P.; Nikoleizig, P.; Schmitz, M.: Präzision aus Schmelze – Beherrschung der Erstarrung im Spritzgießen. In: Integrative Kunststofftechnik 2016, Tagungsband 28. Internationales Kolloquium Kunststofftechnik, Shaker, Aachen, 2016.
- [Hus2004] Hussein, B. G.: Einfluss niederfrequenter Fluidresonanzschwingungen auf den Stoffaustausch in Blasensäulen im System Wasser - Luft. Dissertation, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, 2004.
- [MZY2016] Meng, H.; Zhu, G.; Yu, Y.; Wang, Z.; Wu, J.: The effect of symmetrical perforated holes on the turbulent heat transfer in the static mixer with modified Kenics segments, International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016.
- [NN2004] N.N.: Verfahren zur Intensivierung und Flexibilisierung der Brennraumkühlung von Verbrennungsmotoren. Anmeldung: 22.04.2003. Offenlegungsschrift DE10318285A1. Int. Cl.: F01 P 7/14. Magdeburg (DE): INFERTA - Institut für Fertigungstechnik im Automobilbau GmbH, 11.11.2004. (freier Stand der Technik)
- [NN2013] N.N.: Forschungsstrategie Fortschritt NRW, Hrsg.: Ministerium für Innovation, Wissenschaft und Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf, 2013.
- [Pape2015] Pape, U.: Grundlagen der Finanzierung und Investition, 3. Auflage, DeGruyter, München, 2015.
- [SBG2017] Schläger, M.; Balka, C.; Gießauf, J.: Wer bremst, verliert. In: Kunststoffe 1/2017, S.32-35.
- [SS2014] Stricker, M.; Steinbichler, G.: Wirbel im Temperierkanal. In: Kunststoffe 11/2014, S.44-47.
- [Steil2014] Steinbichler, G.: Einführung in die Kunststofftechnik, Vorlesungsskript, JKU Linz (AT), 2014.
- [Stri2015] Stricker, M.: Methoden und Kennwerte für die Auslegung und den Betrieb von Temperiersystemen in Spritzgießwerkzeugen, Dissertation an der JKU Linz (AT), 2015.

[Tur+2004] Turej, F.; Seime, D.; Briesovsky, J.; Butz, E.; Müller, I.: Vorrichtung und Verfahren zum Hervorrufen einer Flüssigkeitspulsation in einem Wärmeübertrager. Anmeldung: 24.04.2003. Offenlegungsschrift DE10318528A1. Int. Cl.: F28 F 13/10 Merseburg (DE): IVET - Ingenieurgesellschaft für Verfahrensentwicklung und Entsorgungstechnik mbH, 11.11.2004. (freier Stand der Technik)

6. Anhang: Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht	
3. Titel Optimierung des Wärmeübergangs in Temperierungssystemen zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit		
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Anders, Denis, Prof. Dr.-Ing. Lake, Simone, Prof. Dr.-Ing. Werner, Christina, Prof. Dr.	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.03.2023	6. Veröffentlichungsdatum
	7. Form der Publikation Bericht	
	8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Technische Hochschule Köln, Fakultät für Informatik und Ingenieurwissenschaften, Gustav-Heinemann-Ufer 54, 50968 Köln SIMCON kunststofftechnische Software GmbH, Schumanstraße 18A, 52146 Würselen STRIKO Verfahrenstechnik GmbH, Gewerbeparkstraße 27, 51580 Reichshof Jokey Holding GmbH & Co. KG, August-Mittelsten-Scheid-Straße 23, 51688 Wipperfürth	9. Ber. Nr. Durchführende Institution 13FH012PX8
	11. Seitenzahl 57	
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben 16	
	14. Tabellen 1	
	15. Abbildungen 57	
16. Zusätzliche Angaben		
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)		

<p>18. Kurzfassung</p> <p>In den vergangenen Jahren hat sich der Energiebedarf des Spritzgießprozesses dank fortschrittlicher Antriebstechnologien deutlich verringert. Allerdings bleibt ein beachtlicher Anteil dieses Energieverbrauchs nach wie vor dem Temperiersystem vorbehalten. Ein optimierter Wärmeübergang im Temperierkanal bietet das größte Potenzial für weitere Energieeinsparungen. Aus diesem Grund wurde in dem aktuellen Projekt eine gründliche Untersuchung zweier Technologien durchgeführt, die darauf abzielen, den Energiebedarf des Temperiersystems zu minimieren. Im ersten Ansatz wurden statische Mischelemente im Temperierkanal implementiert, um die laminaren Strömungsanteile effizienter zu durchmischen. Dies ermöglicht eine gleichmäßigere Verteilung der Temperatur im Temperierkanal, was wiederum den Energieverbrauch reduziert. Der zweite Ansatz setzt auf eine Pulsationsströmung im Temperierkanal. Diese innovative Technik wurde eingeführt, um eine bessere Wärmeübertragung zu erreichen und Ablagerungen im Temperierkanal zu minimieren. Eine verbesserte Wärmeübertragung führt zu einer effizienteren Temperaturregelung, was wiederum den Energieverbrauch senkt. Um das Potenzial dieser beiden Ansätze zur Energieeinsparung optimal auszuschöpfen, wurden umfangreiche Experimente auf Versuchsständen durchgeführt und die Parameter kontinuierlich optimiert. Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen wird ein fortschrittliches Simulationsmodell entwickelt, das die Auslegung von Werkzeugen für den Spritzgießprozess unterstützt. Die Ergebnisse der Versuchsstände wurden abschließend in realen Anwendungen und Praxisversuchen überprüft, wobei sich die Effizienz dieser Technologien zeigte. Durch die Implementierung dieser Innovationen im Temperiersystem können erhebliche Energieeinsparungen erzielt werden, was nicht nur ökologisch vorteilhaft ist, sondern auch zu erheblichen Kosteneinsparungen in der Produktion führt.</p>	
<p>19. Schlagwörter</p>	
<p>20. Verlag</p>	<p>21. Preis</p>

7. Anhang: Bericht zu „Wirtschaftlichkeitsbetrachtung & Marketingkonzept“

Optimierung des Wärmeübergangs in Temperiersystemen zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit (OptiTemp)

Wirtschaftlichkeitsbetrachtung & Marketingkonzept

Zuwendungsempfänger: TH Köln

Förderkennzeichen: 13FH012PX8

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	3
1. Wirtschaftlichkeitsbetrachtung.....	4
1.1 Kalkulationsschema.....	4
1.1.1 Relevante Kostengrößen zur Berechnung der Herstellkosten.....	7
1.1.2 Ermittlung der Herstellkosten.....	7
1.1.3 Zuschlagssätze für Deckung sonstiger Gemeinkosten / Gewinnmarge.....	8
1.2 Effekte OptiTemp	8
2. Marketingkonzept.....	10
2.1 Produkt.....	10
2.1.1 Produkt/- Dienstleistungsbeschreibung	10
2.1.2 Kundennutzen.....	11
2.1.3 Wissens- und Technologievorsprung.....	12
2.1.4 Stand der Entwicklung	12
2.2 Geschäftsmodell/Organisation.....	13
2.3 Markt und Wettbewerb	15
2.3.1 Branchen- und Gesamtmarktanalyse	16
2.3.2 Marktsegmente und Zielkunden.....	20
2.3.3 Wettbewerbsanalyse / - beobachtung	20
2.3.4 Marktschranken	24
2.4 Marketing und Vertrieb.....	24
2.4.1 Vertriebskonzept.....	24
2.4.2 Kommunikationsstrategie und Maßnahmenplanung	25
2.4.3 Markteintrittsstrategie	26
2.5 Chancen und Risiken	26
Literaturverzeichnis	30

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Gesamtes Kalkulationsschema.....	5
Abbildung 2 Kalkulationsschema für das Temperiergerät	6
Abbildung 3 Positive Effekte von OptiTemp.....	8
Abbildung 4 Negative Effekte von OptiTemp	9
Abbildung 5 Business Model Canvas	14
Abbildung 6 Umsatz der Branche Herstellung von Kunststoffen in Deutschland von 2012 bis 2019 und Prognose bis zum Jahr 2025 (in Milliarden Euro)	17
Abbildung 7 Anteil der Unternehmen mit kostensenkenden Prozessinnovationen in der Gummi- und Kunststoffverarbeitung in Deutschland in den Jahren 2008 bis 2020.....	17
Abbildung 8 Kostensenkungsanteil in der Gummi- und Kunststoffverarbeitung in Deutschland durch Prozessinnovationen in den Jahren von 2008 bis 2020.....	18
Abbildung 9 Verteilung des Marktvolumens von Spritzgießmaschinen in der Europäischen Union nach Ländern im Jahr 2017	19
Abbildung 10 Unterschiedliche Silikonkautschukformen im Vergleich (bezogen zur Kühlzeit in Sekunden)	22
Abbildung 11 Darstellung von MGSS-konformen Kühlkanälen.....	23
Abbildung 12 Vergleich konventionelles und konformes Kühlen	23
Abbildung 13 Vertriebskonzept 1.....	25
Abbildung 14 Vertriebskonzept 2.....	25
Abbildung 15 SWOT-Analyse	29

1. Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Der erste Punkt des Arbeitspaketes „AP 8“ bei der Optimierung des Wärmeübergangs in Temperiersystemen zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit (OptiTemp) beinhaltet die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung. Das Ziel ist die wirtschaftliche Vorteilhaftigkeit der in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern erarbeiteten Optimierungskonzepte (AP 7.2) zu berechnen. Zu diesem Themenkomplex wurde eine Bachelorarbeit von Sergio Ouano, einem Studenten im Bereich Wirtschaftsingenieurwesens, erstellt. Victoria Maier, eine Studentin im Masterstudiengang Wirtschaftsingenieurwesen, hat als wissenschaftliche Hilfskraft für OptiTemp sowohl im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung also auch beim Marketingkonzept die Ergebnisse konkretisiert und zusammengetragen. Zu Beginn sind verschiedene statische und dynamische Investitionsrechenverfahren in Betracht gezogen worden (zu Investitionsrechenverfahren [Pape2015]). Hierbei sollte zunächst eine statische Kostenvergleichsrechnung die Kosteneinsparungen des optimierten Verfahrens hinsichtlich der reduzierten Zykluszeit, der geringen Betriebskosten, der Energieeinsparungen und der reduzierten Wartungs- und Reinigungskosten quantifizieren. Ergänzend bot sich dann die Berechnung dynamischer Verfahren wie die Kapitalwertmethode, die interne Zinsfußmethode und die dynamische Amortisationszeit an, da hier über den Einbezug eines kalkulatorischen Kalkulationszinses die Finanzierungskosten der Unternehmen berücksichtigt werden. Diese Verfahren sollten um Sensitivitätsanalysen erweitert werden, die darüber Auskunft geben, wie sich die relevanten Parameter ändern können, ohne die Wirtschaftlichkeit des Projekts zu gefährden. Die Berechnungen werden auch in der Lehrveranstaltung Finanzierung und Investition (Projektarbeiten) vorgenommen. Allerdings ist zu Beginn dieses Arbeitspaketes aufgefallen, dass sich die Verwendung der statischen sowie dynamischen Investitionsrechenverfahren aufgrund fehlender Daten zu den Kosten als schwierig erweist. Für die Ermittlung der bislang fehlenden Kosten soll ein Kalkulationsschema entwickelt werden.¹

1.1 Kalkulationsschema

Um die Kosten für den Spritzguss zu ermitteln, wird eine Schema für die Kalkulation entwickelt, das die Veränderungen von OptiTemp berücksichtigt. Das Kalkulationsschema ist in Abbildung 1 zu sehen. Dieses basiert auf realen Daten, die von Frau Prof. Lake weitergegeben oder mittels Recherche erfasst wurden. Die beiden Fälle wurden im Schema farblich gekennzeichnet. Des Weiteren sind Anmerkungen bzgl. der Abschreibungsdauer, des Prozentsatzes der Instandhaltung oder der Annahmen in Gelb ersichtlich. Beim entwickelten Kalkulationsschema ist es möglich den zu produzierenden Artikel sowie die Maschine (z.B. nach Name, Artikelnummer etc.) zu Informationszwecken anzugeben. Ebenfalls ist es zu Beginn der Eingabe erforderlich, das Schuss- und Teilgewicht einzutragen. Das Schussgewicht ist das verbrauchte Material, was auf dem Gewicht des Formteils, das Teilgewicht, und dem Anguss resultiert. Zudem kann die Anzahl der Formnester angegeben werden. Das Formnest stellt die Kavität, also den Hohlraum zwischen den beiden Werkzeughälften, welche mit Schmelze gefüllt werden soll, dar. Zudem wird im Kalkulationsschema der Materialaufwand in „kg/Tag“ sowie in „€/Tag“ berechnet, sodass die Angabe der Materialkosten in „€/kg“ erforderlich ist.

¹ Arbeitsgruppe OptiTemp. Vorhabensbeschreibung zur Bekanntmachung: Forschung an Fachhochschulen mit Unternehmen (FHprofUnt 2018), 24.01.2019, S. 10.

Artikel:	Montagering
Maschine:	VC 60/28

	Informationen Frau Prof. Lake
	Informationen Recherche reale Daten

Schußgewicht	6,0 g
Teilgewicht	5,0 g
Anzahl Formnester	4 Stck.
Materialkosten	3,00 €/kg

Anzahl Teile	90 Stck./Std.
Arbeit (1 Schicht)	7,5 Std.
Arbeit gesamt	23 Std.
Anzahl Teile	2025 Stck./Tag
Produktionstage	320 (Annahme)

Investition Maschine	50.000,00 €	
Abschreibung (in Jahre)	6	laut AFA 6 Jahre, reale Nutzung aber mind. 20 Jahre
Aufstellfläche Maschine	15,0 m²	
Durchschnittlicher Stromverbrauch vom Anschlusswert pro Stunde	0,1 kWh	
Schichtbetrieb	3	
Instandhaltung Maschine	4 %	vom Maschinen-Neupreis (Annahme, keine vergleichbaren Daten gefunden)
Kühlwasser	1 m³/Std.	
Kühlwasserpreis	1,65 €/m³	

Maschinenkosten	
Abschreibung	1,16 €/Std.
Zinskosten	0,69 €/Std.
Miete	0,08 €/Std.
Strom	0,038 €/Std.
Kühlung	1,65 €/Std.
Instandhaltung	0,28 €/Std.
Maschinenstundensatz	3,90 €/Std.

Investition Werkzeug	60.000,00 €	
Abschreibung (in Jahre)	5	
Instandhaltung Werkzeug	4 %	vom Werkzeug-Neupreis (Annahme, keine vergleichbaren Daten gefunden)

Werkzeugkosten	2,00 €/Std.
Werkzeugtemperierung	0,7 €/Std.
Lohnkosten	3 €/Std.

Temperiergerät	0,7 €/Std.	Verknüpfung mit unten
Lohn Mitarbeiter	30 €/Std.	
Anzahl Mitarbeiter	0,1	

Materialkosten	6,48 €/Std.
----------------	-------------

Zykluszeit	40 Sek.	
Zinswert	10 %	(Annahme, keine vergleichbaren Daten gefunden)
Laufzeit Std./Tag	23 Std.	
Mietkosten/Monat	5.000,00 €	
Anzahl der m²	1500,00 m²	
Mietkosten/m²	3,3 €/m²	
Strompreis	0,38 €/kWh	
Gewinn/Gemeinkosten	50 %	

HK gesamt	16,044 €/Std.
HK pro Teil	0,18 €/Teil
Gewinn/Gemeinkosten	0,09 €/Teil
Anteil Anguß	1,0 g

Teilekosten	0,27 €/Teil
-------------	-------------

Materialaufwand	12,2 kg/Tag
Materialaufwand	36,45 €/Tag

Abbildung 1 Gesamtes Kalkulationsschema

Kalkulation Temperiergerät

Investition Temperiergerät	6.000,00 €	
Abschreibung (in Jahre)	5	5 Jahre gemäß AfA, realistische Nutzung mindestens 20 Jahre
Zinswert	10 %	(Annahme, keine vergleichbaren Daten gefunden)
Aufstellfläche Temperiergerät	0,2 m²	
Anschlußwert	10 kW	
Durchschnittlicher Stromverbrauch vom Anschlußwert	1 kW	
Instandhaltung Temperiergerät	4 %	vom Maschinen-Neupreis (Annahme, keine vergleichbaren Daten gefunden)

Temperierkosten	
Abschreibung	0,17 €/Std.
Zinskosten	0,08 €/Std.
Strom	0,38 €/Std.
Instandhaltung	0,03 €/Std.
Maschinenstundensatz	0,66 €/Std.

Abbildung 2 Kalkulationsschema für das Temperiergerät

1.1.1 Relevante Kostengrößen zur Berechnung der Herstellkosten

Die relevanten Kostengrößen zur Berechnung der Herstellkosten können in fünf Bereiche eingeteilt werden. Der erste Teilbereich umfasst allgemeingültige Daten wie Informationen zu der Miete, den Lohnkosten, der Anzahl der Mitarbeiter, dem Strompreis und den produzierenden Stunden sprich die Laufzeit am Tag. Es kann ebenfalls der Schichtbetrieb (1-, 2-, 3-Schicht etc.) festgehalten werden. Zudem wird die Stundenanzahl für eine Schicht angegeben, um die Laufzeit am Tag zu bestimmen. Der zweite Teilbereich enthält die Berechnungen für die Teileanzahl, die pro Stunde und pro Tag produziert werden. Für die Berechnung der Teileanzahl pro Stunde muss die Zykluszeit in Sekunden eingetragen werden. Im dritten Teilbereich werden Daten zur Spritzgießmaschine kenntlich gemacht. Neben dem Investitionsbetrag der Spritzgießmaschine wird ebenfalls die Abschreibungsdauer in Jahren, die Aufstellfläche in Quadratmetern sowie der Prozentsatz (vom Maschinen-Neupreis) für die Instandhaltung festgehalten. Zudem ist die Eintragung des Zinswertes für die Berechnung der Zinskosten in 1.1.2 erforderlich. Des Weiteren wird der Anschlusswert pro Stunde, der durchschnittliche Stromverbrauch (vom Anschlusswert pro Stunde), der Kühlwasserverbrauch pro Stunde und der Kühlwasserpreis pro Kubikmeter angegeben. Der vierte Teilbereich beinhaltet Daten zum Werkzeug wie den Investitionsbetrag, den Prozentsatz (vom Werkzeug-Neupreis) für die Instandhaltung und die Abschreibungsdauer in Jahren. Werkzeuge mit einem Anschaffungswert von jeweils bis zu 250 Euro netto werden in einem Sammelposten zusammengefasst und gemeinsam über fünf Jahre linear abgeschrieben. Im letzten Teilbereich wird eine separate Kalkulation für das Temperiergerät aufgeführt, welches in Abbildung 2 dargestellt wird. Hierbei wird wie bereits oben beschrieben der Investitionsbetrag des Temperiergerätes, die Abschreibungsdauer in Jahren, die Aufstellfläche in Quadratmetern sowie der Prozentsatz (vom Neupreis) für die Instandhaltung festgehalten. Für die Berechnung der Zinskosten wird der Zinswert eingetragen. Des Weiteren wird der Anschlusswert pro Stunde und der durchschnittliche Stromverbrauch (vom Anschlusswert pro Stunde) erfasst. Anschließend werden die Temperierkosten in Form eines Maschinenstundensatzes ermittelt. Der Maschinenstundensatz beinhaltet die Aspekte Abschreibung, Zinskosten, Strom und Instandhaltung.

1.1.2 Ermittlung der Herstellkosten

Nach Eingabe aller relevanten Kostengrößen können anschließend die Herstellkosten berechnet werden. Hierfür werden zunächst die Maschinenkosten in Form des Maschinenstundensatzes ermittelt. Es werden für die Abschreibung, die Zinskosten, die Miete, die Kühlung, die Instandhaltung und den Strom die Kosten, die pro Stunde anfallen, berechnet. Für die weitere Ermittlung der Herstellkosten kommen die Werkzeugkosten (Daten des vierten Teilbereiches), die Lohnkosten sowie die Materialkosten hinzu. Zudem werden die Temperierkosten, die ebenfalls in Form eines Maschinenstundensatzes dargelegt wurden, mit in die Berechnung der Herstellkosten einbezogen. Zusammenfassend ergeben sich die gesamten Herstellkosten, die pro Stunde anfallen. Des Weiteren werden die Herstellkosten pro Stück berechnet.

1.1.3 Zuschlagssätze für Deckung sonstiger Gemeinkosten / Gewinnmarge

Im Kalkulationsschema kann der Gewinn bzw. die Gemeinkosten angegeben werden. Diese Angabe wird mit den Herstellkosten pro Stück verrechnet, sodass sich die gesamten Teilekosten ergeben.

1.2 Effekte OptiTemp

Nun werden sowohl die positiven als auch die negativen Effekte von OptiTemp auf die Kostenkalkulation beschrieben. Die positiven sowie die negativen Effekte werden in Abbildung 3 und 4 dargestellt. Zum einen können durch OptiTemp die Energiekosten reduziert werden. Auch der Stundensatz des Temperiergerätes (Werkzeugtemperierung) kann durch den verbesserten Wärmeübergang im Temperierkanal gesenkt werden, sodass insgesamt die Herstellkosten sinken. Ein weiterer Effekt ist die Reduzierung der Zykluszeit durch die Verkürzung der Kühlzeit. Dies führt dazu, dass die Stückanzahl pro Stunde sowie pro Tag erhöht wird. Zum anderen ist OptiTemp mit höheren Werkzeug-, Wartungs- und Reparaturkosten verbunden. Das Temperiergerät, das für mehr Druckaufbau nötig ist, verursacht ebenso höhere Kosten. Zudem kann der Einbau von einem hochwertigen Stahl höhere Investitionen erfordern. Hierbei muss ebenfalls die Werkzeuglebensdauer abgeschätzt werden. Es ist fraglich und zu überprüfen, ob die Verwendung der Mischelemente von STRIKO Verfahrenstechnik GmbH mit einem erhöhten Stromverbrauch einhergeht.

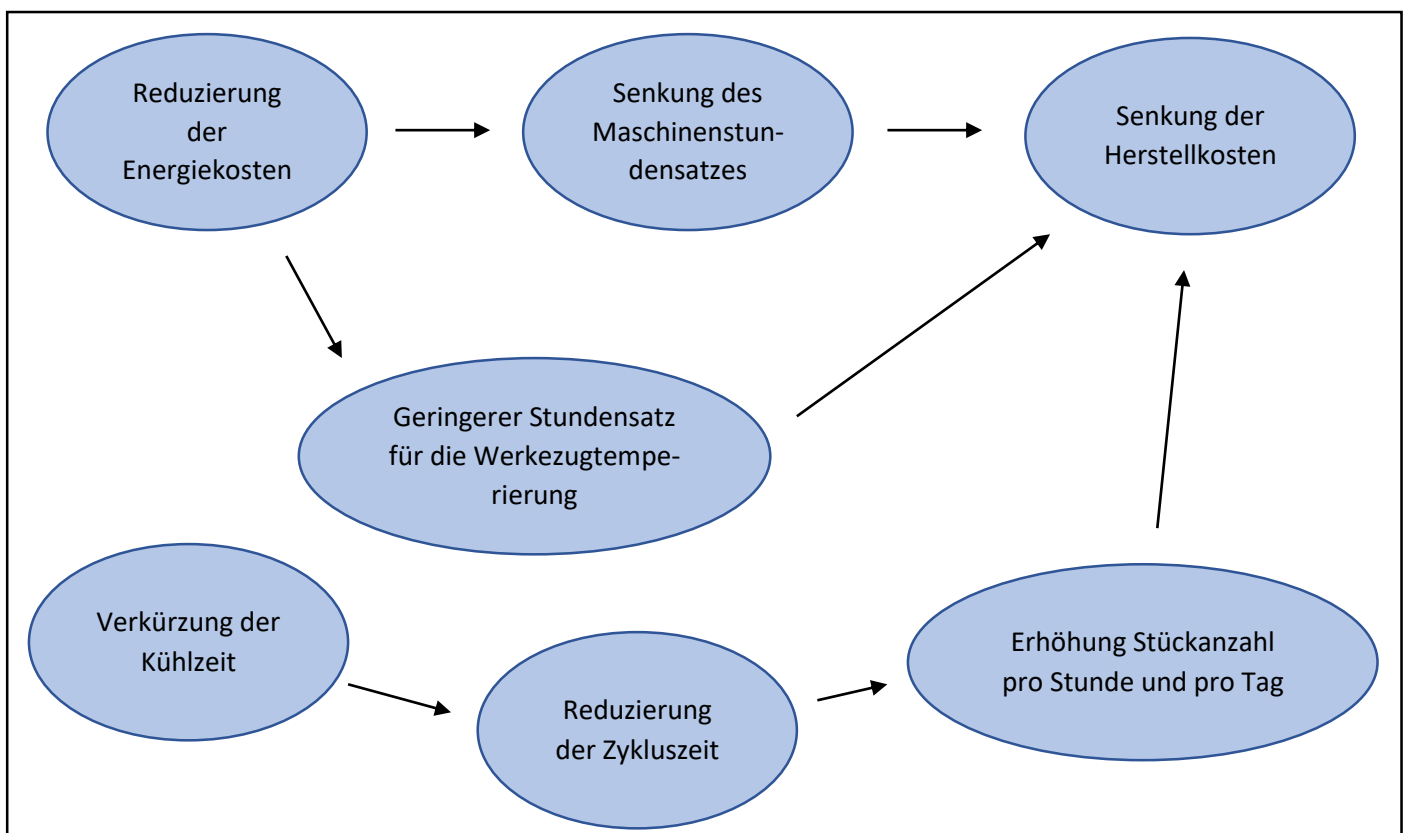


Abbildung 3 Positive Effekte von OptiTemp

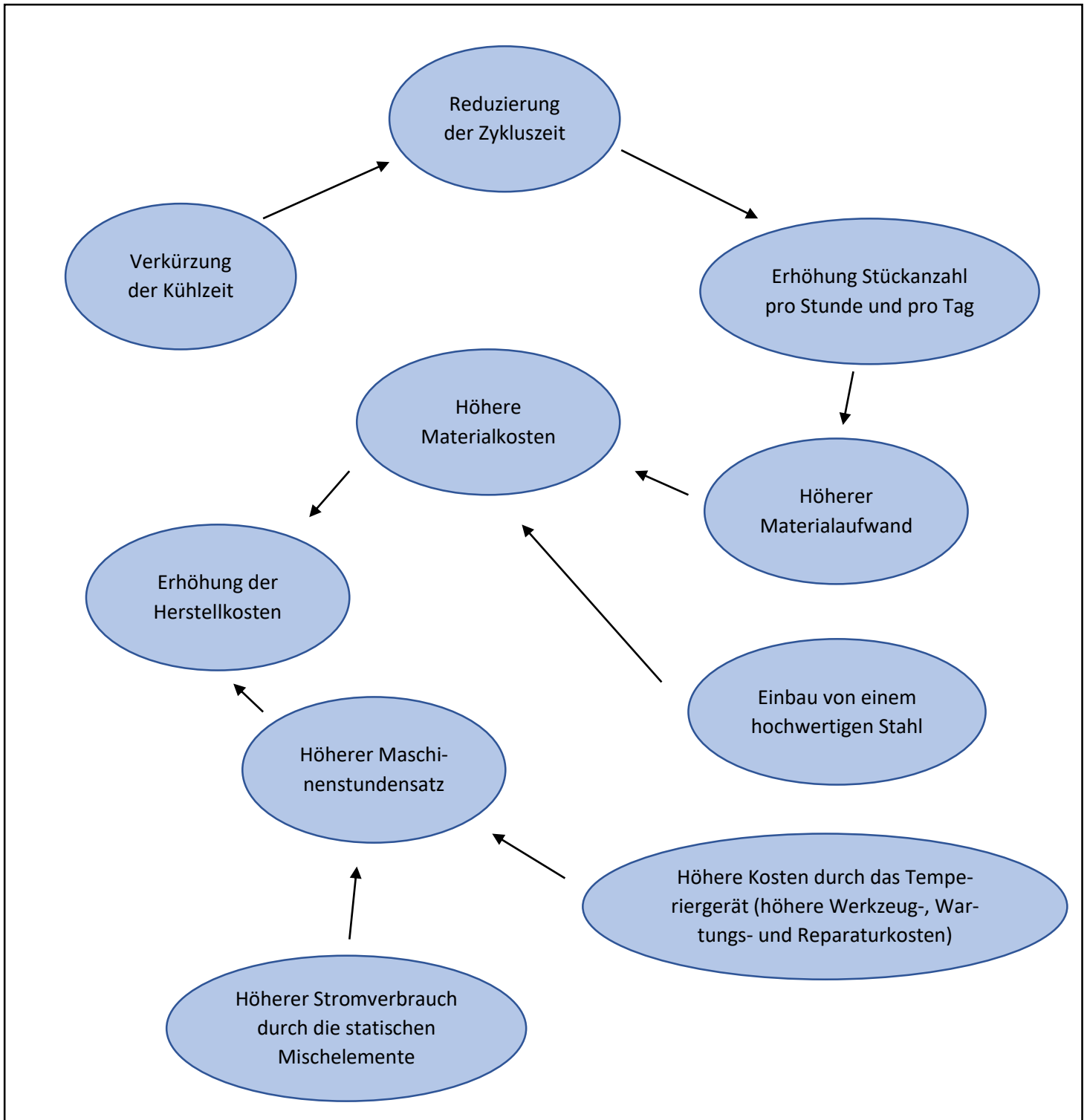


Abbildung 4 Negative Effekte von OptiTemp

2. Marketingkonzept

Nach einer wirtschaftlich sinnvollen Einstufung der Optimierungspotenziale, wird ein Marketingkonzept erarbeitet, welches die Vermarktung der neuen Technologie zum Inhalt hat. Es soll in einer Marktstudie zunächst das Marktpotenzial abgeschätzt werden. Anschließend soll eine Markteintrittsstrategie erarbeitet werden, die neben den 4P des Marketingmix (product, place, price, promotion) auch in einer SWOT-Analyse externe Faktoren wie Risiken und Chancen den Stärken und Schwächen der neuen Technologie gegenübergestellt wird.

2.1 Produkt

Die Energieeffizienz im Spritzguss ist ein wesentliches Entwicklungsthema und stellt gleichzeitig eine gesellschaftliche Herausforderung dar. Hierbei stellt der Wärmeübergang im Temperierkanal des flüssigkeitstemperierten Spritzgießwerkzeugs eine Schwierigkeit für die Energieeffizienz der Werkzeugtemperierung dar. Somit erschließt sich, dass der Wärmeübergang (vor allem bei Rückkühlung des Temperierfluids) für Energieeinsparungen verbessert werden muss. Eine weitere Möglichkeit besteht bei der Nutzung eines intensivierten Wärmeübergangs. Hierdurch kann die Kühlzeit (bis zu 10 Prozent) sowie die Zykluszeit reduziert werden. Zudem wird zu einem reduzierten spezifischen Energiebedarf (Energiebedarf pro Kilogramm verarbeitetem Kunststoff) des Spritzgießzyklus beigetragen. Des Weiteren ist der Einsatz einer dynamischen Temperierung von Spritzgießwerkzeugen möglich. Hierbei findet eine wechselweise Durchströmung mit einem heißen Temperierfluid (Erzielung einer hohen Oberflächenqualität) sowie einem kalten Temperierfluid (Erstarrung des Kunststoffs) in den Temperierkanälen statt. Dies führt zu einem schnelleren Wechsel der Werkzeugtemperatur und somit zu einer Reduzierung der Kühlzeit.²

Zudem können weitere Einsatzgebiete wie die Kühlung der Antriebe von Spritzgießmaschinen und zentrale Kälteanlagen in Betracht gezogen werden. Auch in der Kunststoffverarbeitung (Extrusion → Compoundierung, Thermoformen) sowie im Urformverfahren von Metallen (vor allem im Metall-Druckguss) können weitere Einsatzgebiete ausfindig gemacht werden. Es zeigt sich, dass vor allem thermische Prozesse, bei denen eine Wärmeübertragung stattfindet, optimiert werden können.³

2.1.1 Produkt/- Dienstleistungsbeschreibung

In Anbetracht des beschriebenen Produktes werden unter anderem statische Mischelemente sowie die Pulsation (oszillierende Anregung der Temperiermittelströmung) als eine neuartige Methode für die Temperierung von Spritzgießwerkzeugen zur Verbesserung des Wärmeübertragungsverhaltens

² Arbeitsgruppe OptiTemp. *Vorhabensbeschreibung zur Bekanntmachung: Forschung an Fachhochschulen mit Unternehmen (FHprofUnt 2018)*, 24.01.2019, S. 2.

³ Arbeitsgruppe OptiTemp. *Vorhabensbeschreibung zur Bekanntmachung: Forschung an Fachhochschulen mit Unternehmen (FHprofUnt 2018)*, 24.01.2019, S. 12.

bei reduziertem Wartungs- bzw. Reinigungsaufwand verwendet.⁴ Insgesamt ist für die Energieeffizienz, die Formteilqualität sowie die Kühlzeitreduzierung die Abfuhr der Wärme aus dem Formteil von Bedeutung. Für einen guten Wärmeübergang bei möglichst geringem Druckbedarf werden Mischelemente eingesetzt, die eine optimale Geometrie aufweisen und mit geringem Aufwand montiert werden können.⁵ Hinsichtlich der optimalen Geometrie müssen die Mischelemente aufgrund von sich bildenden Ablagerungen (Kalk, Algen, Bakterien, Korrosion) im Temperierkanal so gestaltet werden, dass die Leistungsfähigkeit durch die Ablagerungen nicht beeinträchtigt wird.⁶ Die Mischelemente bieten unter bestimmten Bedingungen geringe Einsparungen bei geringen Kosten. Die Investitionskosten der Mischelemente sind sehr gering und liegen bei < 10 Euro/m.⁷

2.1.2 Kundennutzen

Die Optimierung der energieeffizienten Wärmeübertragung in Spritzgießwerkzeugen kann durch den einfachen sowie kostengünstigen Einsatz von statischen Mischelementen ermöglicht werden. Gleichzeitig steht dies in Verbindung zu einer Steigerung der Wirtschaftlichkeit. Des Weiteren ist es möglich die Pulsationsströmung zu nutzen. Somit können sowohl weitere Effizienzsteigerungen bei der Wärmeübertragung erzielt als auch das Ablagerungsverhalten im Temperierkanal verbessert werden. Zudem können aufgrund des Ausbleibens einer Aufbereitung des Temperiermediums mit Chemikalien (z.B. Korrosionsschutz oder Biozid) Umweltbelastungen minimiert und die Energieeffizienz sowie die Wirtschaftlichkeit gesteigert werden.⁸

Insgesamt können einige positive Effekte, die die Optimierung des Wärmeübergangs in Temperierungssystemen herbeiführt, festgehalten werden. Zum einen kann durch die Verbesserung des Wärmeübergangs eine Energieeinsparung von 20 bis 70 Prozent und eine Zykluszeitreduktion durch eine Kühlzeitreduktion von bis zu 10 Prozent sowie durch einen schnelleren Temperaturwechsel bei dynamischer Temperierung erzielt werden. Zum anderen können Ablagerungen durch stärkere Strömungsschwankungen mithilfe der Pulsation und durch den Einsatz statischer Mischer minimiert werden.⁹

Zudem wird ein weiterer Vorteil bei der Nachrüstbarkeit ersichtlich. Die bestehenden Spritzgießprozesse können mit geringem Aufwand nachgerüstet werden. Somit können weltweite Energieeinsparungen von 107 TWh¹⁰ bis 375 TWh pro Jahr erreicht werden. Es resultiert eine Reduktion der CO₂-

⁴ Arbeitsgruppe OptiTemp. *Vorhabensbeschreibung zur Bekanntmachung: Forschung an Fachhochschulen mit Unternehmen (FHprofUnt 2018)*, 24.01.2019, S. 3.

⁵ Arbeitsgruppe OptiTemp. *Vorhabensbeschreibung zur Bekanntmachung: Forschung an Fachhochschulen mit Unternehmen (FHprofUnt 2018)*, 24.01.2019, S. 3.

⁶ Arbeitsgruppe OptiTemp. *Vorhabensbeschreibung zur Bekanntmachung: Forschung an Fachhochschulen mit Unternehmen (FHprofUnt 2018)*, 24.01.2019, S. 3.

⁷ Arbeitsgruppe Polymer-Labor. *Projektmeeting zum Austausch und zur Besprechung des Zwischenstandes*, 07.12.2021, S. 21.

⁸ Arbeitsgruppe OptiTemp. *Vorhabensbeschreibung zur Bekanntmachung: Forschung an Fachhochschulen mit Unternehmen (FHprofUnt 2018)*, 24.01.2019, S. 7.

⁹ Anders, Denis und Simone Lake. *FHprofUnt OptiTemp: Optimierung des Wärmeübergangs in Temperierungssystemen zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit: Kick-Off Meeting*, 29.10.2019, S. 5.

¹⁰ Terawattstunde

Emissionen von 50 Mt¹¹ bis 185 Mt sowie weltweite Kosteneinsparungen von 8 Mrd. Euro bis 30 Mrd. Euro pro Jahr.¹²

2.1.3 Wissens- und Technologievorsprung

Es sind bereits einige Forschungsprojekte hinsichtlich der Werkzeugtemperierung bzw. zum Thema „Wärmetauscher“ bearbeitet worden. Allerdings wurde bei den Projekten kein ähnlicher Lösungsansatz (vgl. OptiTemp) beschrieben.¹³ Zudem sind bereits erste Erkenntnisse mithilfe der Optimierungsansätze im Stand der Technik vorhanden. Im Fall der statischen Mischelemente liegen lediglich Erkenntnisse auf einen grundsätzlichen Machbarkeitsnachweis mittels eines stationären Versuchsstands vor. In Bezug zu den Ablagerungen im Temperierkanal sind keinerlei Erkenntnisse über die Anwendbarkeit im Spritzgießprozess zu finden. Die aktuell verfügbaren Mischer bringen nur unter bestimmten Bedingungen Vorteile hervor. Um diese Bedingungen abbilden zu können, sind Versuche beim Projektpartner Jockey geplant. Hinsichtlich der Pulsationsströmung ist der Pulsationserzeuger mittlerweile vorhanden. Allerdings liegen aktuell keine Erkenntnisse über erzielbare Effekte im Spritzgießprozess vor, da die Untersuchungen noch laufen. Insgesamt sind für die Berücksichtigung des Effekts auf die Wärmeübertragung und den Druckbedarf (bei der thermischen und strömungstechnischen Auslegung von Temperiersystemen) in Spritzgießwerkzeugen numerische oder analytische Berechnungsmodelle zu verwenden.¹⁴

2.1.4 Stand der Entwicklung

Der Einsatz von statischen Mischelementen für die Verbesserung des Wärmeübergangs in Temperierkanälen wurde bereits in DE19914058A1 beschrieben, wobei diese nicht mehr aufrechterhalten wird. Es handelt sich somit um den Stand der Technik. Zum Einsatz der Pulsationsströmung zur Optimierung von Wärmeübertragungs- und Ablagerungsvorgängen in Temperierkanälen liegt aktuell kein Patent vor.¹⁵

Eine zusätzliche Recherche zeigte, dass aktuell keinerlei Patente mit einem ähnlichen Lösungsansatz, wie bei OptiTemp beschrieben, vorliegen. Dennoch werden im Folgenden weitere Patente aufgeführt, die sich zum einen mit der Kühlzeitreduzierung und zum anderen mit konturbezogenen Temperierkanälen (wie in 2.3.3 beschrieben) beschäftigen. In DE102010021296A1 wird ein Verfahren bzw. eine Vorrichtung zur Herstellung von Kunststoff-Formteilen beschrieben. Hierbei steht die Reduzierung der Zykluszeit sowie die Verbesserung der Formteilqualität im Fokus.¹⁶ Des Weiteren wird in

¹¹ Einheit für den Ausstoß des Treibhausgases Kohlenstoffdioxid (CO₂) = Megatonne

¹² Arbeitsgruppe OptiTemp. *Vorhabensbeschreibung zur Bekanntmachung: Forschung an Fachhochschulen mit Unternehmen (FHprofUnt 2018)*, 24.01.2019, S. 12.

¹³ Arbeitsgruppe OptiTemp. *Vorhabensbeschreibung zur Bekanntmachung: Forschung an Fachhochschulen mit Unternehmen (FHprofUnt 2018)*, 24.01.2019, S. 12.

¹⁴ Arbeitsgruppe OptiTemp. *Vorhabensbeschreibung zur Bekanntmachung: Forschung an Fachhochschulen mit Unternehmen (FHprofUnt 2018)*, 24.01.2019, S. 6.

¹⁵ Arbeitsgruppe OptiTemp. *Vorhabensbeschreibung zur Bekanntmachung: Forschung an Fachhochschulen mit Unternehmen (FHprofUnt 2018)*, 24.01.2019, S. 7.

¹⁶ Krauss Maffei Tech GmbH. *DE102010021296A1: Verfahren und Vorrichtung zur Herstellung von Kunststoff-Formteilen*. Hrsg. von Espacenet, November 2011.

DE102010017014A1 ein Verfahren zur Herstellung von konturbezogenen Temperierkanälen in Werkzeugen bzw. Werkzeugeinsätzen beschrieben.¹⁷

2.2 Geschäftsmodell/Organisation

Um das Geschäftsmodell visualisieren und strukturieren zu können, ist das „Business Model Canvas“, dargestellt in Abbildung 5, eingesetzt worden. Hierbei sind neun unterschiedliche Felder zu betrachten. Im Mittelpunkt des „Business Model Canvas“ befindet sich das Wertangebot, die „Value Proposition“. In diesem Feld wird festgehalten, mit welchem Leistungsversprechen das Unternehmen am Markt auftritt. Im Falle „OptiTemp“ kann festgehalten werden, dass vor allem drei Aspekte betrachtet werden. Neben der Reduzierung der Zykluszeit geht die mögliche Energieeinsparung sowie die Senkung der Herstellkosten einher. Im nächsten Feld „customer segments“ werden die Kunden bzw. die Zielgruppen betrachtet. Hier stehen vor allem Spritzgießmaschinenhersteller bei einer direkten Implementierung oder Unternehmen in der Kunststoffverarbeitung, also die Anwender von Spritzgießmaschinen, für die Nachrüstbarkeit im Vordergrund. Im nächsten Feld „channels“ werden die Kanäle für die Erreichung der Kunden festgehalten. Mögliche Kanäle sind Messen, Fachzeitschriften, Websites oder die Werbung über Spritzgießmaschinenhersteller. Im weiteren Feld „customer relations“ werden Aspekte hinsichtlich der Pflege der Kundenbeziehungen notiert. Hierbei können Service- und/oder Wartungsangebote, Neukundenrabatte oder Staffelpreise (für mehr nachgerüstete Spritzgießmaschinen) angeboten werden. Zu den „revenue streams“ gibt es grundlegend drei Möglichkeiten. Zum einen können die statischen Mischelemente (von STRIKO) oder der Pulsator (Gerät für oszillierende Anregung der Temperiermittelströmung) verkauft werden. Zum anderen kann im Allgemeinen das Verfahren sprich die Optimierung des Wärmeübergangs in Temperiersystemen auf den Markt gebracht werden. In Bezug zu den „key partnerships“ basiert das Geschäftsmodell auf folgenden Partnerschaften:

- Unternehmen, die für das Nachrüsten zuständig sind und diese durchführen
- Logistikpartner für den Transport (falls erforderlich)
- Verbundpartner, die für die Kooperation mit den Spritzgießmaschinenherstellern sowie den Unternehmen in der Kunststoffverarbeitung zuständig sind
- Werbepartnerschaften

Im Feld „key resources“ werden die benötigten Ressourcen für das Geschäftsmodell festgehalten. Zum einen handelt es sich bei der Website um eine wichtige Ressource, um die Vermarktung einfacher zu gestalten. Zum anderen werden Verbundpartner für die Kooperation benötigt. Zudem können Patente erforderlich sein, um das Verfahren zu schützen. Bei den „key activities“ können Aktivitäten wie der Kundenservice oder das Marketing vollzogen werden, um das Geschäftsmodell voranzutreiben. In Betracht der wichtigsten Ausgaben, im Feld „cost structures“, stehen vor allem das Personal, der Vertrieb, das Marketing und die mögliche Produktion sowie Logistik (im Falle des Verkaufs der statischen Mischelemente oder des Pulsators) im Vordergrund.

¹⁷ Newkon GmbH. DE102010017014A1: Verfahren und Anordnung zur Herstellung von konturbezogenen Temperierkanälen in Werkzeugen bzw. Werkzeugeinsätzen, Kernen und Schiebern. Hrsg. von Espacenet, Februar 2012.

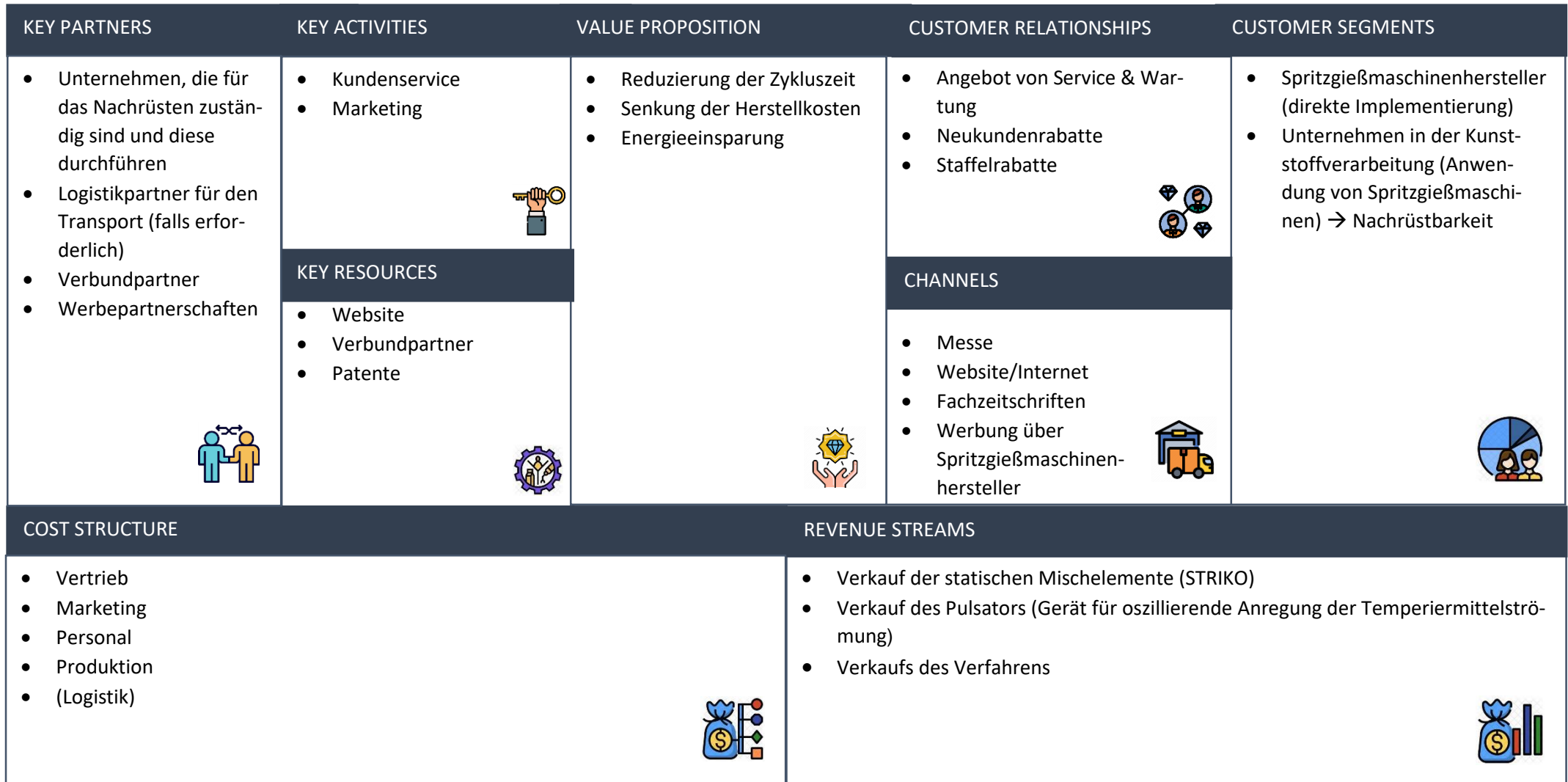


Abbildung 5 Business Model Canvas

2.3 Markt und Wettbewerb

Der Markt der Kunststoffverarbeitung erbringt einen durchschnittlichen Jahresumsatz von circa 66 Milliarden Euro.¹⁸ Hierbei ist anzumerken, dass mit einem stetigen Wachstum des Jahresumsatzes in der kunststoffverarbeitenden Industrie zu rechnen ist.¹⁹ In Anbetracht der kostensenkenden Prozessinnovationen kann ebenfalls ein Wachstum dessen erwartet werden.²⁰ Somit kann „OptiTemp“ den Anteil der kostensenkenden Prozessinnovationen sowie den einhergehenden Kostensenkungsanteil ausbauen. Deutschland umfasst ein Marktvolumen (von Spritzgießmaschinen in der Europäischen Union) von 57 Prozent.²¹ Der hohe Anteil kann vor allem zu Beginn, also der Markteinführung, ausgenutzt werden. Vor allem der Trend auf einen stärkeren Fokus auf die Energieeinsparung kann „OptiTemp“ für sich gewinnen. In Anbetracht des Wettbewerbs werden ähnliche Verfahren betrachtet, die ebenfalls mit der Energieeinsparung und der Kostensenkung einhergehen.

¹⁸ Statistisches Bundesamt. *Anzahl der Unternehmen in der deutschen Kunststoffindustrie nach Sektoren im Jahr 2021*. Hrsg. von Statista, März 2022.

¹⁹ Statistisches Bundesamt. *Umsatz der Branche Herstellung von Kunststoffen in Deutschland von 2012 bis 2019 und Prognose bis zum Jahr 2025 (in Milliarden Euro)*. Hrsg. von Statista, Juli 2021.

²⁰ ZEW. *Anteil der Unternehmen mit kostensenkenden Prozessinnovationen in der Gummi- und Kunststoffverarbeitung in Deutschland in den Jahren 2008 bis 2020*. Hrsg. von Statista, Januar 2022.

²¹ Europäische Kommission & Eurostat. *Verteilung des Marktvolumens von Spritzgießmaschinen in der Europäischen Union nach Ländern im Jahr 2017*. Hrsg. von Statista, Juli 2018.

2.3.1 Branchen- und Gesamtmarktanalyse

In Anbetracht der Branchen- und Gesamtmarktanalyse werden zunächst die Anteile an der Verwendung von Kunststoff in Europa nach Einsatzgebieten in den Jahren 2018 bis 2020 angeschaut.²² Mit knapp 40 Prozent wird Kunststoff für Verpackungen verwendet. Es folgt der Bau mit circa 20 Prozent. Etwa ein Zehntel der Kunststoffe werden für die Fahrzeuge benötigt. Neben der Elektronik mit 6,2 Prozent werden für Haushalt/Freizeit/Sport etwa 4 Prozent und für die Landwirtschaft circa 3,4 Prozent der Kunststoffe verwendet. Zudem werden 16,7 Prozent in der Kategorie „Sonstiges“ zusammengefasst.

Der Umsatz der Kunststoff verarbeitenden Industrie in Deutschland nach Branchen in den Jahren 2019 bis 2021 kann in vier Abschnitte unterteilt werden.²³ Hierbei wird der durchschnittliche Jahresumsatz angegeben:

1. Der Bau mit 24 Milliarden Euro
2. Die technischen Teile mit 19 Milliarden Euro
3. Die Verpackungen mit circa 15 Milliarden Euro
4. Die Konsumprodukte mit circa 10 Milliarden Euro

Insgesamt erbringt die Kunststoffverarbeitung einen durchschnittlichen Jahresumsatz von 65,52 Milliarden Euro. Die Anzahl der Unternehmen in der deutschen Kunststoffindustrie nach Sektoren im Jahr 2021 beträgt insgesamt 1.679 Unternehmen.²⁴

Abbildung 6 stellt den Branchenumsatz der Herstellung von Kunststoffen in Deutschland von 2012 bis 2025 in Milliarden Euro dar. Dabei sind die Jahre 2020 bis 2025 als eine Prognose anzusehen. Anhand der Abbildung 6 zeigt sich deutlich, dass ein Zuwachs des Branchenumsatzes zu erwarten ist.

²² PlasticsEurope & Conversio. *Anteile an der Verwendung von Kunststoff in Europa nach Einsatzgebieten in den Jahren 2018 bis 2020*. Hrsg. von Statista, Dezember 2021.

²³ Gesamtverband Kunststoffverarbeitende Industrie. *Umsatz der Kunststoff verarbeitenden Industrie in Deutschland nach Branchen in den Jahren 2019 bis 2021 (in Milliarden Euro)*. Hrsg. von Statista, März 2022.

²⁴ Statistisches Bundesamt. *Anzahl der Unternehmen in der deutschen Kunststoffindustrie nach Sektoren im Jahr 2021*. Hrsg. von Statista, März 2022.

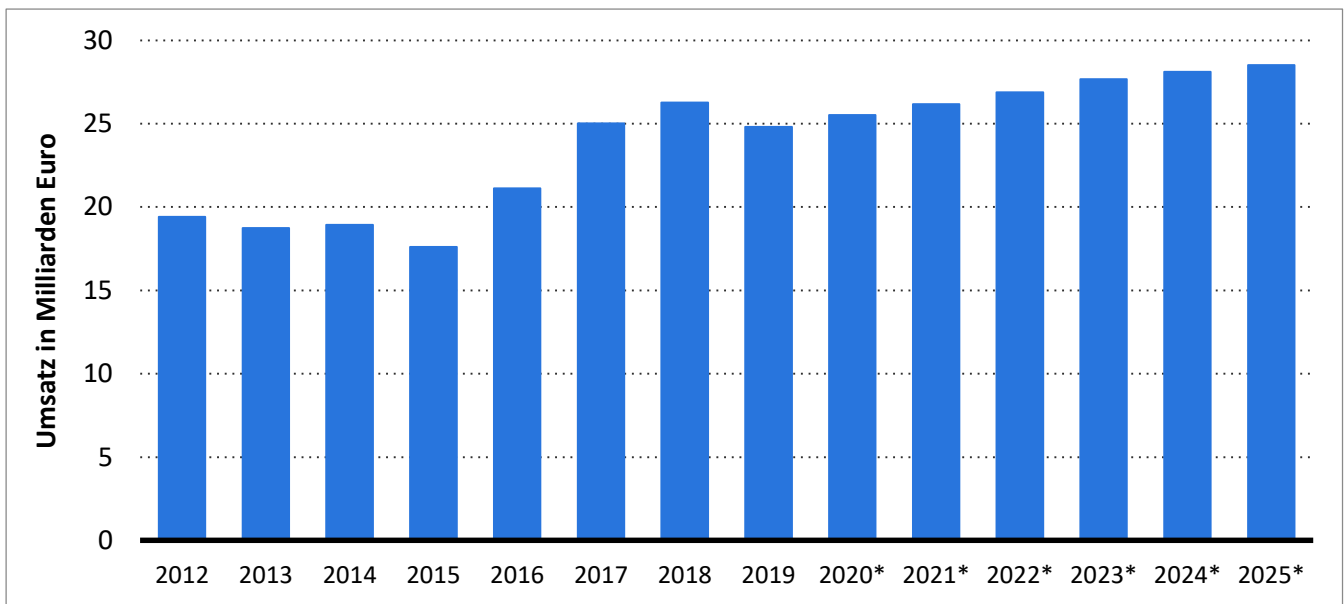


Abbildung 6 Umsatz der Branche Herstellung von Kunststoffen in Deutschland von 2012 bis 2019 und Prognose bis zum Jahr 2025 (in Milliarden Euro)²⁵

Abbildung 7 zeigt den Anteil der Unternehmen mit kostensenkenden Prozessinnovationen in der Gummi- und Kunststoffverarbeitung in Deutschland in den Jahren 2008 bis 2020. Im Jahr 2008 lag der Anteil der Unternehmen mit kostensenkenden Prozessinnovationen bei 25 Prozent. In den zwei darauffolgenden Jahren ist dieser Anteil gesunken. Im Jahr 2011 konnte ein deutlicher Anstieg des Anteils mit 35 Prozent verzeichnet werden.

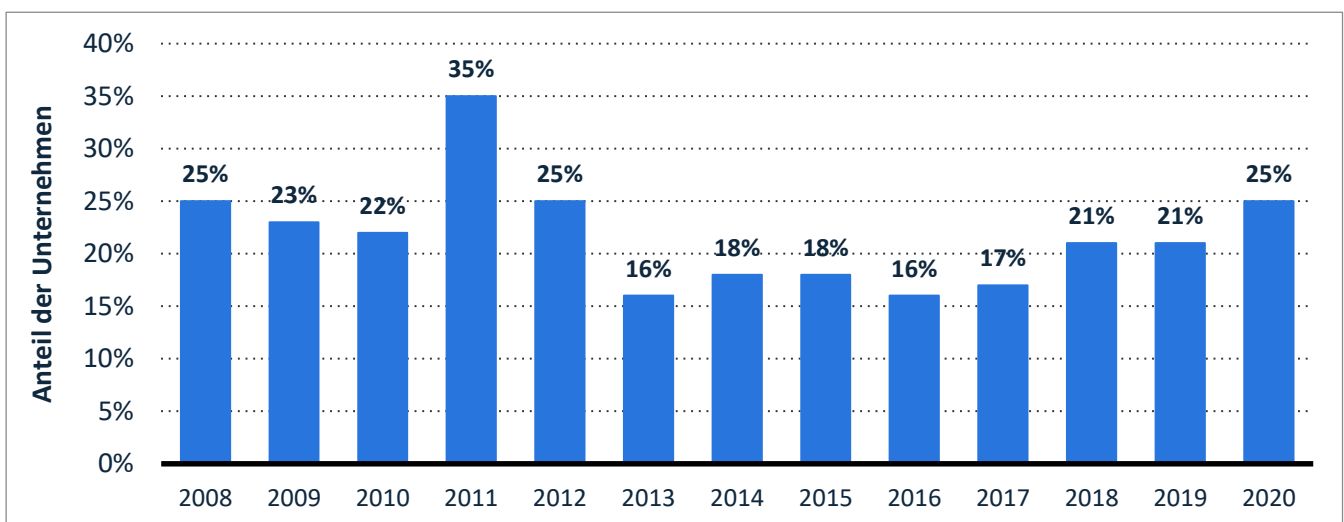


Abbildung 7 Anteil der Unternehmen mit kostensenkenden Prozessinnovationen in der Gummi- und Kunststoffverarbeitung in Deutschland in den Jahren 2008 bis 2020²⁶

²⁵ Statistisches Bundesamt. *Umsatz der Branche Herstellung von Kunststoffen in Deutschland von 2012 bis 2019 und Prognose bis zum Jahr 2025 (in Milliarden Euro)*. Hrsg. von Statista, Juli 2021.

²⁶ ZEW. *Anteil der Unternehmen mit kostensenkenden Prozessinnovationen in der Gummi- und Kunststoffverarbeitung in Deutschland in den Jahren 2008 bis 2020*. Hrsg. von Statista, Januar 2022.

Allerdings ist dieser Anteil im nächsten Jahr um 10 Prozent gesunken. Eine weitere Reduzierung des Anteils wurde im Jahr 2013 verzeichnet. Hier lag der Anteil bei 16 Prozent. Seit 2017 ist eine deutliche Steigerung des Anteils sichtbar. Im Jahr 2020 arbeiten 25 Prozent der Unternehmen in der Gummi- und Kunststoffverarbeitung in Deutschland mit kostensenkenden Prozessinnovationen.

Zudem zeigt Abbildung 8 den Kostensenkungsanteil in der Gummi- und Kunststoffverarbeitung in Deutschland durch Prozessinnovationen in den Jahren von 2008 bis 2020. Die Änderungen der Kostensenkungsanteile der Jahre 2008 bis 2013 zeigen einen nahezu gleichen Verlauf wie in Abbildung 7 dargestellt. Der höchste Kostensenkungsanteil wird im Jahr 2015 mit 5,6 Prozent erzielt. In den darauffolgenden Jahren sinkt der Kostensenkungsanteil konstant bis zu 2 Prozent im Jahr 2020.

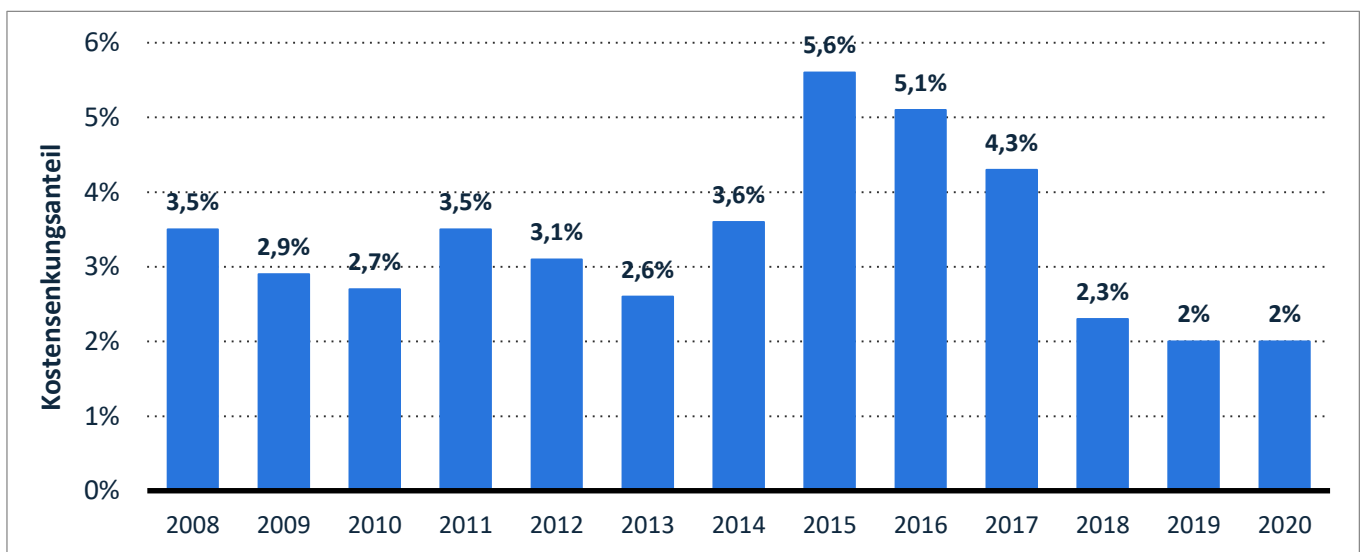


Abbildung 8 Kostensenkungsanteil in der Gummi- und Kunststoffverarbeitung in Deutschland durch Prozessinnovationen in den Jahren von 2008 bis 2020²⁷

Es gibt einige Hersteller von Spritzgießmaschinen für die die positiven Effekte, die durch OptiTemp generiert werden, in Frage kommen können. Hier werden einige Spritzgießmaschinenhersteller aufgelistet:

- Kunststofftechnik Wägemann GmbH
- Haitian International Germany GmbH
- REP International
- PRESMA SPA
- Billion Kunststofftechnik GmbH
- BMB S.p.A.
- Borsche North America
- COMI SpA
- ENGEL AUSTRIA GmbH
- ARBURG GmbH & Co. KG

²⁷ ZEW. Kostensenkungsanteil in der Gummi- und Kunststoffverarbeitung in Deutschland durch Prozessinnovationen in den Jahren von 2008 bis 2020. Hrsg. von Statista, Januar 2022.

- Dr. Boy GmbH & Co. KG
- Klöckner DESMA Elastomertechnik GmbH
- Ferromatik Milacron GmbH

In Hinblick auf das Marktvolumen wird in Abbildung 9 die Verteilung des Marktvolumens von Spritzgießmaschinen in der Europäischen Union nach Ländern im Jahr 2017 dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass Deutschland mit 57 Prozent den höchsten Anteil am Marktvolumen hat. Es folgen Italien mit 8 Prozent, Frankreich mit 3 Prozent und Spanien mit einem Prozent. Die übrigen EU Staaten teilen sich 31 Prozent des Marktvolumens.

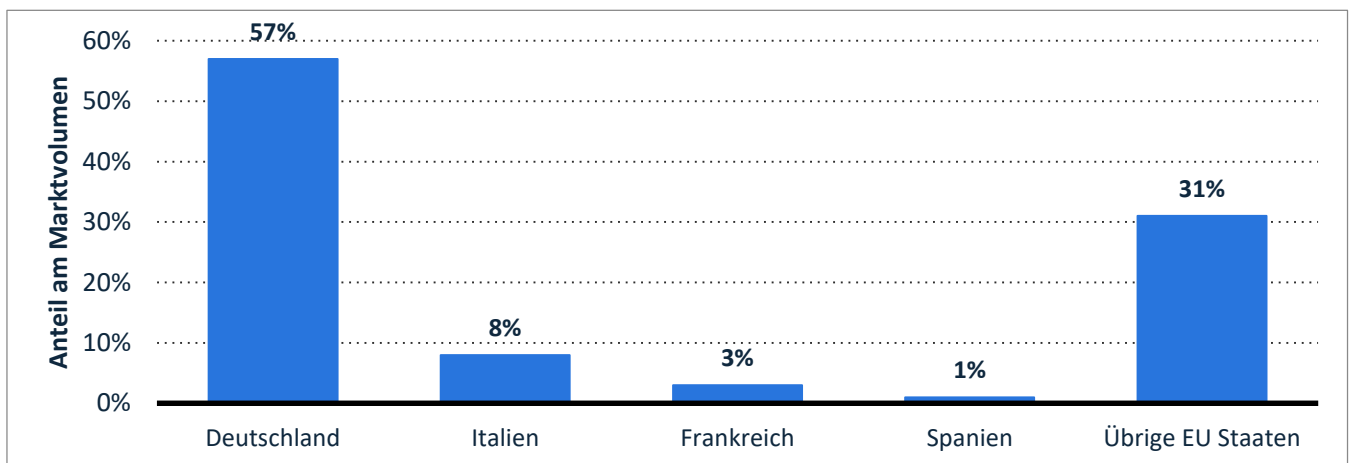


Abbildung 9 Verteilung des Marktvolumens von Spritzgießmaschinen in der Europäischen Union nach Ländern im Jahr 2017²⁸

Laut der europäischen Kommission und Eurostat (06.07.2018) erreichen die Gummi- und Kunststoffmaschinen in der EU im Jahr 2017 einen Wert von 10,2 Milliarden Euro. Hierbei haben die Spritzgießmaschinen einen Anteil von 21 Prozent.²⁹

In Anbetracht des weltweiten Marktes für Spritzgießmaschinen ist China mit der höchsten Anzahl an Spritzgießmaschinen auf Platz 1. Weitere Länder Asiens wie Vietnam, Thailand und Indien, China ist hier bereits aufgeschlossen, belegen den zweiten Platz. Anschließend folgen Europa und Amerika (vor allem Brasilien, USA und Mexiko).³⁰

Bezüglich der Trends im Spritzguss steht vor allem der stärkere Fokus auf den Energieverbrauch (besonders bei der aktuellen Situation) im Vordergrund.³¹ Dieser Trend geht mit den Vorteilen bzw. den Zielen von OptiTemp (vgl. Abschnitt 2.1.2) einher.

²⁸ Europäische Kommission & Eurostat. *Verteilung des Marktvolumens von Spritzgießmaschinen in der Europäischen Union nach Ländern im Jahr 2017*. Hrsg. von Statista, Juli 2018.

²⁹ Europäische Kommission & Eurostat. *Marktanteile der EU-Länder an Gummi- u. Kunststoffmaschinen 2017*. Hrsg. von Quest Trend Magazin, Juli 2018.

³⁰ ENGEL Austria GmbH. *Globalisierung der Märkte aus Sicht des Kunststoff-Maschinenbaus*, o. D., S.3f.

³¹ ENGEL Austria GmbH. *Globalisierung der Märkte aus Sicht des Kunststoff-Maschinenbaus*, o. D., S.6.

2.3.2 Marktsegmente und Zielkunden

Es wird die Branche der Kunststoffverarbeitung betrachtet. Dies kann zum Beispiel grob in den Bau, in die technischen Teile, in die Verpackungen sowie in die Konsumprodukte unterteilt werden. Im Allgemeinen kann ebenfalls von der Kunststoff verarbeitenden Industrie gesprochen werden. In Hinblick auf die Markteinführung sollte der Fokus erst einmal auf Deutschland liegen, da hier das höchste Marktvolumen mit 57 Prozent, im Vergleich zu anderen Ländern der Europäischen Union, vorliegt. Zudem können die Anwender von Spritzgießmaschinen aufgrund der möglichen Nachrüstbarkeit als erste Zielkunden angesehen werden. Vor allem aus dem durchschnittlichen Jahresumsatz von 66 Milliarden Euro sowie aus der Anzahl der Unternehmen, die in der deutschen Kunststoffindustrie im Jahr 2021 insgesamt 1.679 Unternehmen umfassen, geht hervor, dass hier ein großes Potenzial vorhanden ist. Des Weiteren wurde bereits in Abbildung 6 erkenntlich, dass ein Zuwachs des Branchenumsatzes zu erwarten ist. Somit kann die Nachfrage durchaus steigen. Ein weiterer Aspekt für die Einbeziehung der Anwender von Spritzgießmaschinen wird durch den Anteil der Unternehmen mit kostensenkenden Prozessinnovationen in der Gummi- und Kunststoffverarbeitung deutlich. Im Jahr 2020 sind allein 25 Prozent der Unternehmen in der Gummi- und Kunststoffverarbeitung in Deutschland Unternehmen, die mit kostensenkenden Prozessinnovationen arbeiten. Hierbei ist ebenfalls ein stetiges Wachstum, vor allem durch das größere Interesse an der Energieeinsparung, zu erwarten. In Anbetracht der einhergehenden Kostensenkungsanteile, die in Abbildung 8 dargestellt werden, kann die leichte Senkung des Anteils bis zu 2 Prozent im Jahr 2020 als weiteres Potenzial für den Ausbau der Kostensenkung angesehen werden. Als weitere Zielkunden können die Spritzgießmaschinenhersteller in Betracht gezogen werden. Hier wäre es möglich direkt mit diesen in Kontakt zu treten. Somit kann ein einfacherer Eintritt in den Markt geschaffen werden. Zudem werden in Abschnitt 2.3.1 einige Hersteller von Spritzgießmaschinen aufgelistet, für die, die positiven Effekte, die durch OptiTemp generiert werden, in Frage kommen können.

2.3.3 Wettbewerbsanalyse / - beobachtung

Eine weitere Möglichkeit, um Energien sowie Kosten zu senken, ist die konsequente Nutzung anfallender Wärme. Anstatt Heizung und Kühlung bei jedem Zyklus sehr energieintensiv hochzufahren, wird nur gekühlt. Dies hat vor allem bei komplexen Geometrien, besonders auch bei der Verarbeitung von Polypropylen, Auswirkungen. Ebenso hat diese Möglichkeit einen Einfluss auf die Bauteilqualität sowie auf die Maschineneffizienz. Zum einen wird die Bauteilqualität, auch hinsichtlich der Qualität der Bauteiloberfläche, gesteigert. Zu anderen werden die Zykluszeiten aufgrund der gleichmäßigen Kühlung gekürzt.³²

Eine weitere Möglichkeit der Energie- und Kostensenkung ist die Berücksichtigung des Toleranzbereiches der Prozessparameter im Spritzgießprozess. Bei der Produktion der Formteile im Toleranzbereich werden die Qualitätsanforderungen erfüllt. Gleichzeitig bieten die Toleranzbereiche das Potenzial, den Energieverbrauch zu reduzieren. Zum Beispiel kann die Massetemperatur (wird benötigt, um das Kunststoffgranulat zu schmelzen) in Betracht gezogen werden. Weitere Prozessparameter, die die Formteilqualität und den Energieverbrauch beeinflussen, ist der Nachdruck, die Einspritzzeit, die

³² ONI-Wärmetrafo GmbH. *Weniger Energie für besseres Spritzgießen*, 23. September 2017.

Schließkraft oder die Werkzeugwandtemperatur. Insgesamt kann durch eine optimalere Einstellung der Zylindertemperatur, der Werkzeugtemperatur, der Kühlzeit, des Nachdrucks und des Einspritzvolumens der Energieverbrauch gesenkt, das Teilegewicht erhöht sowie die Schwindung und die Maßabweichung reduziert werden. Allerdings ist diese Möglichkeit (energieoptimierende Denkweise bei der Festlegung der Prozessparameter) aufgrund der Vielzahl an Prozessparameter und den jeweiligen Abhängigkeiten nicht weit verbreitet.³³

Der Ansatz zur Optimierung von Spritzgießparametern ist ebenfalls von Singh et al. aufgegriffen worden. Hierbei werden die Prozessparameter Einspritzdruck, Schmelztemperatur, Packzeit und Packdruck unter Berücksichtigung der Zykluszeit und des Verzugs optimiert.³⁴ Für die Ermittlung der optimalen Werte wird unter anderem die Taguchi-Methode eingesetzt.

Zudem können Einsparungen der Energiekosten die Rentabilität sowie die Wettbewerbsfähigkeit steigern. Zum einen können kürzere Zykluszeiten den Durchsatz beim Spritzgießen erhöhen. Zum anderen können Produktionskosten durch Minimierung des Ausschussanteils oder der Lohn-, Wartungs- und Reparaturkosten sowie durch einen effizienteren Einsatz des Rohmaterials reduziert werden. Bei allen Prozessen sollte nur die nötige Energie verbraucht, aber gleichzeitig eine gleichbleibende oder verbesserte Produktivität und Produktqualität erzielt werden. Zudem hat der Staudruck einen Einfluss auf den Stromverbrauch. Über eine zusätzliche Dissipation wird die Schmelztemperatur erhöht. Somit kommt es zu einer erhöhten Wärmeabfuhr an die Umgebung. Durch unterschiedliche Schneckenkonzepte (andere Aufschmelzprinzipien und Scher- und Mischteile) kann dies verbessert werden. Eine weitere Möglichkeit besteht bei der Antriebsart der Spritzgießmaschine. Hier werden die hydraulischen Antriebe durch die elektrischen Antriebe ersetzt. Die elektrischen Antriebe weisen auf einfache Getriebe (für die rotatorischen Bewegungen) sowie auf einen besseren Wirkungsgrad hin. Zudem kann die Reduzierung der abgeführten Wärme an die Umgebung reduziert werden, indem die Plastifiziereinheit isoliert wird. Ebenfalls sollten Werkzeuge, die mit deutlich höheren Temperaturen als der Umgebungstemperatur temperiert werden, durch Wärmedämmplatten von der Maschine thermisch getrennt werden. Dadurch kann eine höhere Reproduzierbarkeit der thermischen Randbedingungen und damit einhergehende Formteilqualität erreicht werden. Durch die Integration von Heißkanalverteilersystemen im Werkzeug kann zusätzlich Energie eingespart werden. Zudem können Zuleitungen so kurz wie nötig ausgeführt und evtl. isoliert werden.³⁵

Druckluft ist ein praktisches Hilfsmittel beim Spritzguss. Dennoch verursacht es zehn Prozent der Gesamtenergiekosten. Mithilfe eines effektiven Druckluftmanagementprogramm können bis zu 50 Prozent an Energieeinsparungen erzielt werden. Zudem sollten Leckagen reduziert werden, um den Verbrauch und somit die Produktionskosten zu minimieren. Das Bereitstellen des Kühlwassers verursacht 11 bis 16 Prozent des Gesamtenergieverbrauchs. Um die Wärmeaufnahme zu reduzieren, können gedämmte Rohre zwischen der Kältemaschine und der Gussform verwendet sowie nicht genutzte Kreisläufe getrennt werden. Zudem kann eine Temperaturerhöhung vorgenommen werden. Die Kühlwassertemperaturen sollten so hoch wie möglich sein (bspw. Erhöhung um 1 °C), um die Betriebskosten von Kältemaschinen zu verringern.³⁶

³³ IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover. *Qualität erhöhen, Energieverbrauch senken – ein Leitfaden*, o. D., S. 2.

³⁴ Singh, Gurjeet, M.K. Pradhan & Ajay Verma. „Multi response optimization of injection moulding process parameters to reduce cycle time and warpage.“ *materialstoday: proceedings* 5, Nr. 2 (2018), S. 8398.

³⁵ Wortberg, J., R. Michels & M. Neumann. *Energieeinsparpotentiale in der kunststoffverarbeitenden Industrie*. Hrsg. von Fraunhofer Institut Systemtechnik und Innovationsforschung, o. D., S. 1ff.

³⁶ ExxonMobil. *Leitfaden „Energiesparen für Spritzgießbetriebe“*, o. D., S. 11ff.

Eine weitere Möglichkeit der Zykluszeitverkürzung bezieht sich auf Silikonkautschukformen. Hierbei wird die Wärmeleitfähigkeit durch Zugabe von Füllstoffen verbessert. Im Vergleich zu herkömmlichen Silikonkautschukformen kann eine Verkürzung der Kühlzeit um bis zu 69,1 Prozent erreicht werden.³⁷ Die Kühlzeiten der unterschiedlichen Silikonkautschukformen (konventionell, mit 60 gew.-% Al-Pulver und mit einer hohen Kühlleistung) werden in Abbildung 10 dargestellt. Dort wird ebenfalls die Kühlzeitverkürzung um bis zu 69,1 Prozent ersichtlich.

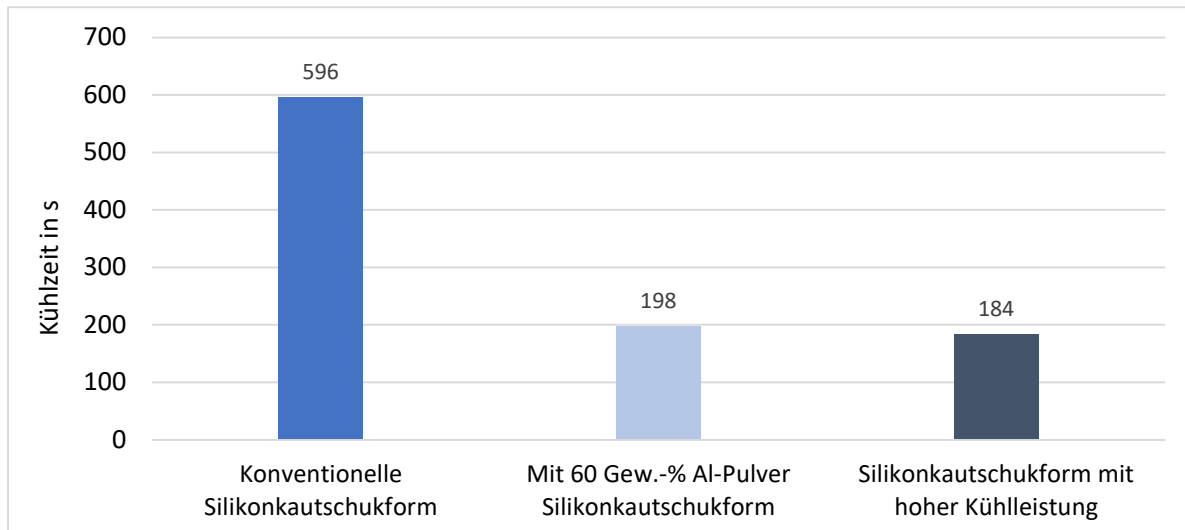


Abbildung 10 Unterschiedliche Silikonkautschukformen im Vergleich (bezogen zur Kühlzeit in Sekunden)³⁸

Zudem konnte die Wärmeleitfähigkeit um bis zu 77,6 Prozent im Vergleich zu herkömmlichen Silikonkautschukformen erhöht werden.³⁹

Des Weiteren treten oft Schwierigkeiten bei der Erreichung einer effizienten Kühlung mit gleichmäßiger Wärmeverteilung auf. Hier können konforme Kühlkanäle (MGSS konforme Kühlkanäle) in Betracht gezogen werden, die eine bessere Wärmeverteilung sowie eine verkürzte Kühlzeit erzielen.⁴⁰ Zudem kann die Produktivität, ohne Beeinträchtigung der Qualität, verbessert werden.

³⁷ Kuo, Chil-Chyuan & Wei-Hua Chen. „Improving cooling performance of injection molding tool with conformal cooling channel by adding hybrid fillers.“ *Polymers* 13, Nr. 8 (2021), S. 1.

³⁸ Kuo, Chil-Chyuan & Wei-Hua Chen. „Improving cooling performance of injection molding tool with conformal cooling channel by adding hybrid fillers.“ *Polymers* 13, Nr. 8 (2021), S. 17.

³⁹ Kuo, Chil-Chyuan & Wei-Hua Chen. „Improving cooling performance of injection molding tool with conformal cooling channel by adding hybrid fillers.“ *Polymers* 13, Nr. 8 (2021), S. 20f.

⁴⁰ Shayfull, Z., S. Sharif, A. M. Zain, R. M. Saad & M. A. Fairuz. „Milled groove square shape conformal cooling channels in injection molding process.“ *Materials and Manufacturing Processes* 28, Nr. 8 (2013), S. 884.

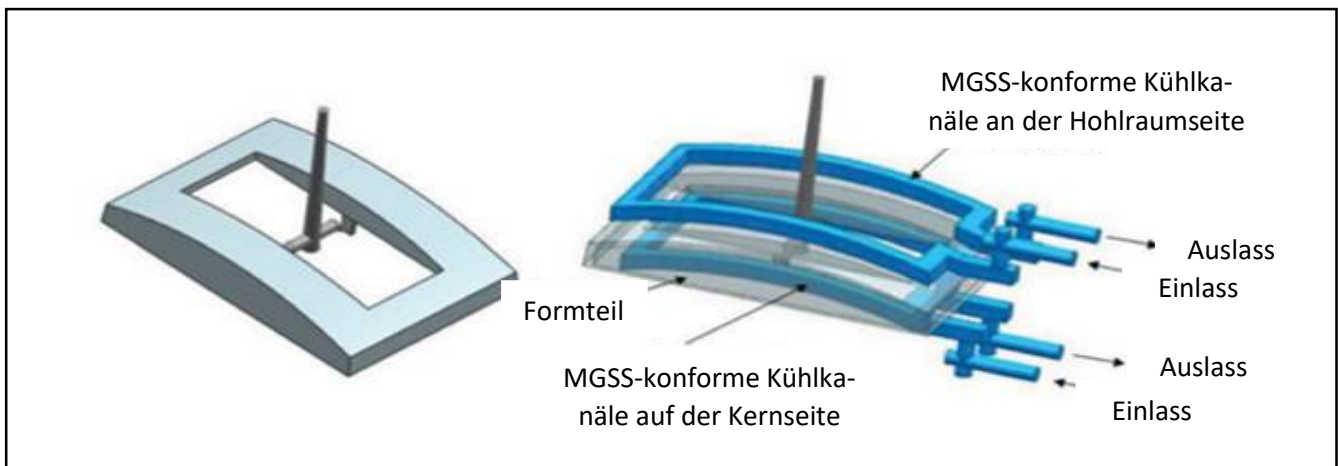


Abbildung 11 Darstellung von MGSS-konformen Kühlkanälen⁴¹

In Abbildung 11 werden die MGSS-konformen Kühlkanäle veranschaulicht. Erkennbar ist, dass die Kühlkanäle an die Form der Formteile angepasst sind. Insgesamt zeigen die Ergebnisse eine verbesserte thermische Verteilung von 12 bis 50 Prozent sowie eine Reduzierung der Kühlzeit von 6 bis 8 Prozent an.⁴²

Die soeben aufgeführte Möglichkeit der Kühlzeitreduzierung wurde ebenfalls von Gries et al. aufgegriffen. Durch die Optimierung der Form und Position mithilfe einer konturnahen Kühlung soll die Kühlzeit verkürzt und eine homogene Temperaturverteilung über die gesamte Werkzeugoberfläche hergestellt werden. Weitere positive Effekte sind die höheren Produktionsraten aufgrund der schnelleren Abkühlung sowie eine verbesserte Qualität des hergestellten Produkts.⁴³

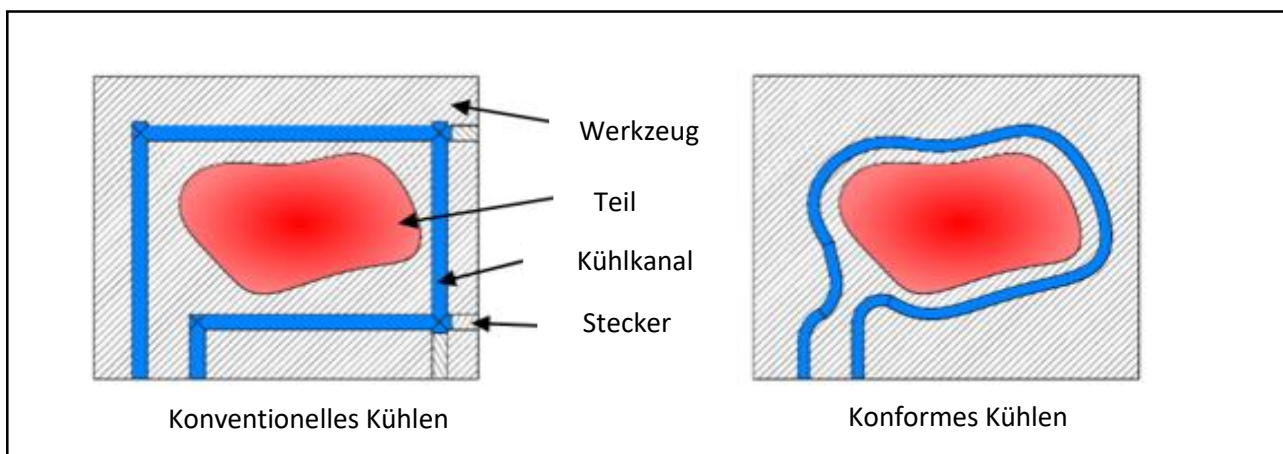


Abbildung 12 Vergleich konventionelles und konformes Kühlen⁴⁴

⁴¹ Shayfull, Z., S. Sharif, A. M. Zain, R. M. Saad & M. A. Fairuz. „Milled groove square shape conformal cooling channels in injection molding process.“ *Materials and Manufacturing Processes* 28, Nr. 8 (2013), S. 885.

⁴² Shayfull, Z., S. Sharif, A. M. Zain, R. M. Saad & M. A. Fairuz. „Milled groove square shape conformal cooling channels in injection molding process.“ *Materials and Manufacturing Processes* 28, Nr. 8 (2013), S. 884.

⁴³ Gries, Sebastian, Guillaume Meyer, Andreas Wonisch, Reinhard Jakobi & Christian Mittelstedt. „Towards enhancing the potential of injection molding tools through optimized close-contour cooling and additive manufacturing.“ *Materials* 14 (2021), S. 1.

⁴⁴ Gries, Sebastian, Guillaume Meyer, Andreas Wonisch, Reinhard Jakobi & Christian Mittelstedt. „Towards enhancing the potential of injection molding tools through optimized close-contour cooling and additive manufacturing.“ *Materials* 14 (2021), S. 2.

In Abbildung 12 wird das konventionelle mit dem konformen bzw. konturnahen Kühlen verglichen. Beim konformen bzw. konturnahen Kühlen verlaufen die Kühlkanäle eng an der Form des Formteils. Dadurch kann eine Reduzierung der Kühlzeit von bis zu 40 Prozent ermöglicht werden.⁴⁵

2.3.4 Marktschranken

In Bezug zum Projekt „OptiTemp“, also bei der Optimierung des Wärmeübergangs in Temperiersystemen zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit, bestehen einige Marktschranken, die zu berücksichtigen sind. Zum einen ist die Praxistauglichkeit der Pulsationsströmung hinsichtlich der Anforderungen an einen Pulsationserzeuger nicht nachgewiesen. Es ist ebenfalls unklar, mit welchen Herstellkosten zu rechnen sind. Zum anderen liegen bislang keine Erkenntnisse über die Anwendbarkeit der statischen Mischelemente im Spritzgießprozess (z.B. in Bezug zu den Ablagerungen im Temperierkanal) vor. Zudem ist unklar, ob die angepassten Mischelemente stärkere Effekte erzielen können. Als ein Risiko kann die starke Begünstigung von Ablagerungen im Temperierkanal durch die Nutzung der Mischelemente angesehen werden. Dies wäre mit einem erhöhten Wartungsaufwand verbunden.⁴⁶ Es ist ebenfalls anzumerken, dass ein Nachbau der zu vertreibenden Produkte bei fehlendem Patentschutz durch Wettbewerber möglich ist. Vor allem können die statischen Mischelemente simpel hergestellt und somit leichter nachgebaut werden. Als eine weitere Marktschranke sind die weiteren Verfahren für die Energie- und Kostensenkung (z.B. konsequente Nutzung anfallender Wärme, Berücksichtigung des Toleranzbereiches der Prozessparameter im Spritzgießprozess) zu berücksichtigen, da diese gegenüber OptiTemp eine gewisse Konkurrenz darstellen.

2.4 Marketing und Vertrieb

In Anbetracht des Marketings und Vertriebs werden im Folgenden das Vertriebskonzept, die Kommunikationsstrategie bzw. die Maßnahmenplanung sowie die Markteintrittsstrategie näher betrachtet.

2.4.1 Vertriebskonzept

Hinsichtlich des Vertriebskonzepts können zwei unterschiedliche Möglichkeiten festgehalten werden. Die erste Möglichkeit besteht bei der Zusammenarbeit mit den Herstellern von Spritzgießmaschinen. Somit wird ein leichter Zugang zum Markt geschaffen, da die Produkte über die Hersteller an die Anwender von Spritzgießmaschinen verkauft werden können.

⁴⁵ Gries, Sebastian, Guillaume Meyer, Andreas Wonisch, Reinhard Jakobi & Christian Mittelstedt. „Towards enhancing the potential of injection molding tools through optimized close-contour cooling and additive manufacturing.“ *Materials* 14 (2021), S. 2.

⁴⁶ Arbeitsgruppe OptiTemp. *Vorhabensbeschreibung zur Bekanntmachung: Forschung an Fachhochschulen mit Unternehmen (FHprofUnt 2018)*, 24.01.2019, S. 12.

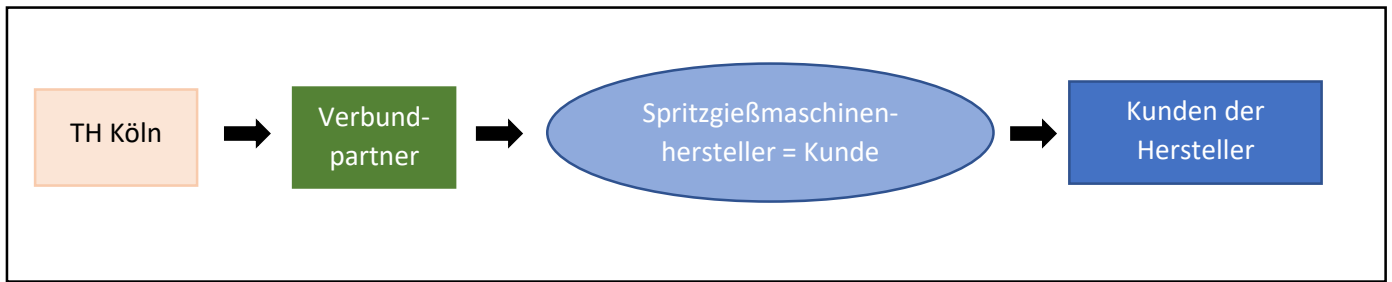


Abbildung 13 Vertriebskonzept 1

In Abbildung 13 wird das oben beschriebene Vertriebskonzept „Vertriebskonzept 1“ dargestellt. Innerhalb dieses Konzepts befinden sich ebenfalls Verbundpartner, die für die Kooperation mit den Spritzgießmaschinenherstellern zuständig sind.

Die zweite Möglichkeit besteht bei der Zusammenarbeit mit den Unternehmen, die die Spritzgießmaschinen in ihrer Produktion anwenden. Somit können bereits bestehende Spritzgießmaschinen mit dem zu verkaufenden Produkt (Pulsator, statische Mischelemente, Verfahren) nachgerüstet werden.

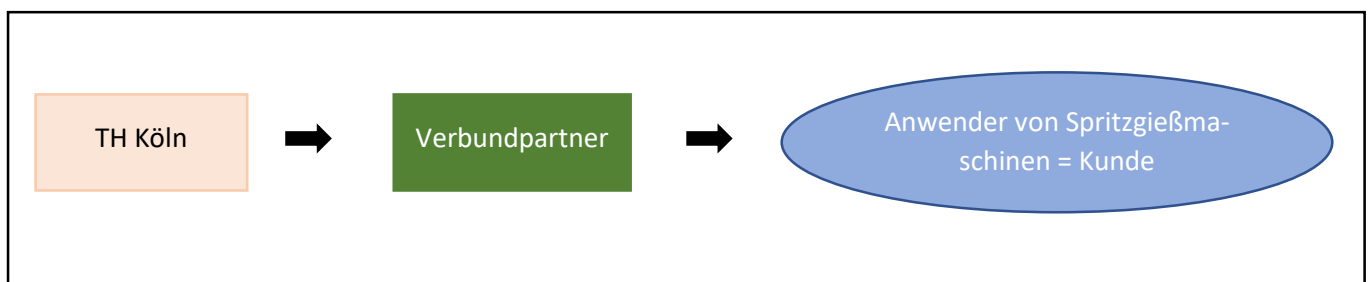


Abbildung 14 Vertriebskonzept 2

In Abbildung 14 wird das oben beschriebene Vertriebskonzept „Vertriebskonzept 2“ dargestellt. Innerhalb dieses Konzepts befinden sich ebenfalls Verbundpartner. Bei den Verbundpartnern handelt es sich hierbei um Unternehmen, die für das Nachrüsten zuständig sind und diese durchführen.

Im Allgemeinen kann hier der Fokus auf das Business-to-Business-Geschäft gelegt werden.

2.4.2 Kommunikationsstrategie und Maßnahmenplanung

In Anbetracht der Kommunikationsstrategie und der Maßnahmenplanung kann zunächst festgehalten, wie potenzielle Kunden angesprochen werden können. Hierbei ist es beispielsweise möglich eine Website zu dem zu verkaufenden Produkt freizuschalten. Es kann eine direkte Ansprache zu den Kunden erfolgen. Dies wäre ebenfalls bei Messen möglich. Des Weiteren kann die Aufmerksamkeit seitens des Kunden mithilfe von Online-Beiträgen sowie Fachzeitschriften erlangt werden. Nichtsdestotrotz

sollte bei allen Möglichkeiten vor allem der Kundennutzen im Fokus stehen und öffentlich kommuniziert werden. Hinsichtlich einer möglichen Bindung zu den Kunden kann überlegt werden, ob Wartungs- und Reparaturarbeiten in Frage kommen könnten.

2.4.3 Markteintrittsstrategie

In Anbetracht der Markteintrittsstrategie sollte, wie bereits in Abschnitt 2.3 beschrieben, der Fokus zunächst auf Deutschland liegen. Folgende Punkte sprechen dafür:

- Überschaubarkeit
- Größtes Marktvolumen (mit 57 Prozent im Vergleich zu anderen Ländern der Europäischen Union)
- Großes Innovationspotenzial
- Starker Fokus sowie Verfolgung der Energieeinsparung

Im weiteren Verlauf könnte in Betracht gezogen werden den Markt auf ganz Europa (z.B. Italien, Frankreich, Spanien laut Abbildung 9) auszuweiten. Anschließend könnte die globale Ebene mit den Ländern China, Vietnam, Thailand, Indien, Brasilien, USA und Mexiko näher betrachtet werden.

2.5 Chancen und Risiken

Im letzten Kapitel werden die Chancen und Risiken seitens der Umwelt bzw. des Marktes sowie die Stärken und Schwächen des eigenen „Unternehmens“ in Zusammenhang mit „OptiTemp“ betrachtet. Die gesamte SWOT-Analyse wird in Abbildung 15 dargestellt.

Im linken, oberen Quadranten werden die Stärken bzw. die Chancen dargestellt. In diesem Fall ergeben sich einige positive Effekte, die zu berücksichtigen sind. Zum einen steht die Energieeinsparung durch energiesparende Konzepte und Technologien immer. Die Wirtschaftlichkeit kann durch die Optimierung des Wärmeübergangs in Temperiersystemen gesteigert werden. Diese Optimierung geht mit der Reduzierung der Energiekosten, der Senkung der Herstellkosten und der Verkürzung der Zykluszeit einher. Die Hersteller von Anlagen und Maschinen wollen ihre stromeffizienten Produkte entsprechend vermarkten. Das Thema „Energiesparen“ kann auch als eine Form des Marketings angesehen werden. Zum anderen ist starkes Marktwachstum in Asien (China, Vietnam, Thailand, Indien) sowie ein Wachstum in Süd- und Mittelamerika und Osteuropa zu erwarten. Weitere interessante Märkte befinden sich in Europa sowie in Amerika (Brasilien, USA, Mexiko). Somit ist eine weltweite Nachfrage ersichtlich. In Deutschland/Österreich herrscht ebenfalls ein ausgeprägter Innovationsmarkt. Zudem erzielt Deutschland (im Vergleich zu anderen europäischen Ländern) mit 57 Prozent den höchsten Anteil am Marktvolumen. Insgesamt ergibt sich steigender Anteil der Unternehmen mit kostensenkenden Prozessinnovationen (in der Gummi- und Kunststoffverarbeitung in Deutschland). Zudem liegt der aktuelle Kostensenkungsanteil bei rund 2 Prozent, was ein sehr großes Verbesserungspotenzial darstellt. Es gibt einige Spritzgießmaschinenhersteller für die die positiven Effekte von „OptiTemp“ in Frage kommen können. Des Weiteren ist eine Nachrüstbarkeit bei bereits vorhandenen Spritzgießmaschinen mit geringem Aufwand möglich.

Im rechten, oberen Quadranten werden die Schwächen bzw. die Chancen dargestellt. Hier ist festzuhalten, dass höhere Werkzeug-, Wartungs- und Reparaturkosten hinsichtlich des Projektes „Opti-Temp“ möglich sind. Vor allem bei der Verwendung der Mischelemente von STRIKO Verfahrenstechnik GmbH ist ein erhöhter Stromverbrauch unausweichlich.

Im linken, unteren Quadranten werden die Stärken bzw. die Risiken dargestellt. Es sind zahlreiche Forschungsprojekte im Bereich der Werkzeugtemperierung oder zum Themenbereich Wärmetauscher bearbeitet worden. Allerdings wird hier kein ähnlicher Lösungsansatz aufgegriffen. In DE19914058A1 ist zudem der Einsatz statischer Mischelemente beschrieben worden, um den Wärmeübergang in Temperierkanälen zu verbessern. Allerdings wurde die Patentschrift nicht mehr aufrechterhalten, sodass es sich hierbei um den Stand der Technik handelt. Erkenntnisse über die Anwendbarkeit der Mischelemente im Spritzgießprozess z.B. hinsichtlich Ablagerungen im Temperierkanal liegen nicht vor. Zur Pulsationsströmung ist kein aufrechterhaltenes Patent bekannt.

Im rechten, unteren Quadranten werden die Schwächen bzw. die Risiken dargestellt. Zum einen gibt es weitere (bereits bestehende) Verfahren, um Energien sowie Kosten zu senken (z.B. konsequente Nutzung anfallender Wärme, Berücksichtigung des Toleranzbereiches der Prozessparameter im Spritzgießprozess). Hierbei ergeben sich ggf. zu geringe Einsparungen gegenüber den Wettbewerbern. Zum anderen ist ein Nachbau durch Wettbewerber bei fehlendem Patentschutz möglich. Außerdem ist unklar, inwieweit die angepassten Mischelemente stärkere Effekte erzielen können. Auch die Anforderungen an den Pulsationserzeuger sowie die Herstellkosten sind bei der Anwendbarkeit der Pulsationsströmung noch unklar.

SWOT-Analyse		Interne Analyse (Unternehmen)	
		Stärken (strengths)	Schwächen (weakness)
Externe Analyse (Umwelt, Markt)	Chancen (opportunities)	<ul style="list-style-type: none"> Energieeinsparung durch energiesparende Konzepte und Technologien stehen immer mehr im Fokus (finanzielle/ökonomische sowie ökologische Gründe) Hersteller von Anlagen und Maschinen wollen ihre stromeffizienten Produkte entsprechend vermarkten → Das Thema „Energiesparen“ kann auch als eine Form des Marketings angesehen werden (wirtschaftlicher Faktor) Steigernde Wirtschaftlichkeit durch Optimierung des Wärmeübergangs in Temperiersystemen (Reduzierung der Energiekosten, Senkung der Herstellkosten, Verkürzung der Zykluszeit = höhere Stückzahl) Starkes Marktwachstum in Asien (China, Vietnam, Thailand, Indien), Wachstum in Süd- und Mittelamerika und Osteuropa, weitere Märkte in Europa sowie Amerika (Brasilien, USA, Mexiko) → weltweite Nachfrage In Deutschland/Österreich herrscht ein ausgeprägter Innovationsmarkt Vergleich in Europa: Deutschland hat mit 57 Prozent den höchsten Anteil am Marktvolumen Hohe Anzahl an Spritzgießmaschinenherstellern für die die positiven Effekte von „OptiTemp“ in Frage kommen können Steigender Anteil der Unternehmen mit kostensenkenden Prozessinnovationen (Gummi- und Kunststoffverarbeitung in Deutschland) → Aktueller Kostensenkungsanteil bei rund 2 Prozent → Sehr großes Verbesserungspotenzial Nachrüstbarkeit mit geringem Aufwand möglich 	<ul style="list-style-type: none"> Höhere Werkzeug-, Wartungs- und Reparaturkosten möglich Verwendung der Mischelemente von STRIKO Verfahrenstechnik GmbH → erhöhter Stromverbrauch möglich

	Risiken (threats)	<ul style="list-style-type: none"> • In DE19914058A1 ist der Einsatz statischer Mischelemente beschrieben, um den Wärmeübergang in Temperierkanälen zu verbessern → Die Patentschrift wird nicht mehr aufrechterhalten (= Stand der Technik) • Zur Pulsationsströmung ist kein aufrechterhaltenes Patent bekannt • Zahlreiche Forschungsprojekte im Bereich der Werkzeugtemperierung oder allgemeiner, zum Themenbereich Wärmetauscher bearbeitet, jedoch weist keines dieser Projekte einen ähnlichen Lösungsansatz auf • Erkenntnisse über die Praxistauglichkeit der Mischelemente im Spritzgießprozess z.B. hinsichtlich Ablagerungen im Temperierkanal liegen nicht vor 	<ul style="list-style-type: none"> • Weitere (bereits bestehende) Verfahren, um Energien sowie Kosten zu senken (z.B. konsequente Nutzung anfallender Wärme, Berücksichtigung des Toleranzbereiches der Prozessparameter im Spritzgießprozess) → ggf. zu geringe Einsparungen gegenüber Wettbewerbern • Nachbau durch Wettbewerber bei fehlendem Patentschutz • Es ist unbekannt, ob sich mit speziell angepassten Mischelementen noch stärkere Effekte erzielen lassen • Die Praxistauglichkeit der Pulsationsströmung ist nicht nachgewiesen, da unklar ist, welche Anforderungen an einen Pulsationserzeuger gestellt werden und zu welchen Kosten ein solcher hergestellt werden kann
--	------------------------------	--	---

Abbildung 15 SWOT-Analyse

Literaturverzeichnis

Anders, Denis und Simone Lake. *FHprofUnt OptiTemp: Optimierung des Wärmeübergangs in Temperierungssystemen zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit: Kick-Off Meeting.* TH Köln – University of Applied Sciences, 29.10.2019.

Arbeitsgruppe OptiTemp. *Vorhabensbeschreibung zur Bekanntmachung: Forschung an Fachhochschulen mit Unternehmen (FHprofUnt 2018).* TH Köln – University of Applied Sciences, 24.01.2019.

Arbeitsgruppe Polymer-Labor. *Projektmeeting zum Austausch und zur Besprechung des Zwischenstandes.* TH Köln – University of Applied Sciences, 07.12.2021.

ENGEL Austria GmbH. *Globalisierung der Märkte aus Sicht des Kunststoff-Maschinenbaus, o. D.* URL: http://gkv-tecpart.de/images/tecpart/Veranstaltungen/tec_par_liebig_146_weitergabe.pdf (Zugriff am 19. September 2022).

Europäische Kommission & Eurostat. *Marktanteile der EU-Länder an Gummi- u. Kunststoffmaschinen 2017.* Hrsg. von Quest Trend Magazin, Juli 2018. URL: <https://www.quest-trendmagazin.de/maschinenbau/gummi-und-kunststoffmaschinen/marktanteile-der-eu-laender-an-gummi-und-kunststoffmaschinen.html> (Zugriff am 19. September 2022).

Europäische Kommission & Eurostat. *Verteilung des Marktvolumens von Spritzgießmaschinen in der Europäischen Union nach Ländern im Jahr 2017.* Hrsg. von Statista, Juli 2018. URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/666529/umfrage/marktvolumen-von-spritzgießmaschinen-in-der-eu-nach-laendern/> (Zugriff am 19. September 2022).

ExxonMobil. *Leitfaden „Energiesparen für Spritzgießbetriebe“, o. D.* URL: <https://www.mobil.com/de/industrial/-/media/global/product-pages/ee-guide-de.pdf> (Zugriff am 19. September 2022).

Gesamtverband Kunststoffverarbeitende Industrie. *Umsatz der Kunststoff verarbeitenden Industrie in Deutschland nach Branchen in den Jahren 2019 bis 2021 (in Milliarden Euro).* Hrsg. von Statista, März 2022. URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/200614/umfrage/umsatz-der-kunststoff-verarbeitenden-industrie/> (Zugriff am 19. September 2022).

Gries, Sebastian, Guillaume Meyer, Andreas Wonisch, Reinhard Jakobi & Christian Mittelstedt. „Towards enhancing the potential of injection molding tools through optimized close-contour cooling and additive manufacturing.“ *Materials* 14 (2021). URL: <http://dx.doi.org/10.3390/ma14123434> (Zugriff am 19. September 2022).

IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover. *Qualität erhöhen, Energieverbrauch senken – ein Leitfaden*, o. D. URL: https://www.iph-hannover.de/media/files/downloads/Whitepaper_Energiesparen.pdf (Zugriff am 19. September 2022).

Krauss Maffei Tech GmbH. *DE102010021296A1: Verfahren und Vorrichtung zur Herstellung von Kunststoff-Formteilen.* Hrsg. von Espacenet, November 2011. URL: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/044900432/publication/DE102010021296A1?q=DE102010021296A1> (Zugriff am 21. September 2022).

Kuo, Chil-Chyuan & Wei-Hua Chen. „Improving cooling performance of injection molding tool with conformal cooling channel by adding hybrid fillers.“ *Polymers* 13, Nr. 8 (2021). URL: <http://dx.doi.org/10.3390/polym13081224> (Zugriff am 19. September 2022).

Newkon GmbH. *DE102010017014A1: Verfahren und Anordnung zur Herstellung von konturbezogenen Temperierkanälen in Werkzeugen bzw. Werkzeugeinsätzen, Kernen und Schiebern.* Hrsg. von Espacenet, Februar 2012. URL: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/045494733/publication/DE102010017014A1?q=DE102010017014A1> (Zugriff am 21. September 2022).

ONI-Wärmetrafo GmbH. *Weniger Energie für besseres Spritzgießen*, 23. September 2017. URL: <https://www.oni.de/fachbeitraege/weniger-energie-fuer-besseres-spritzgiessen/> (Zugriff am 19. September 2022).

PlasticsEurope & Conversio. *Anteile an der Verwendung von Kunststoff in Europa nach Einsatzgebieten in den Jahren 2018 bis 2020.* Hrsg. von Statista, Dezember 2021. URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/206528/umfrage/verwendung-von-kunststoff-in-europa-nach-einsatzgebieten/> (Zugriff am 19. September 2022).

Shayfull, Z., S. Sharif, A. M. Zain, R. M. Saad & M. A. Fairuz. „Milled groove square shape conformal cooling channels in injection molding process.“ *Materials and Manufacturing Processes* 28, Nr. 8 (2013): S. 884-891. URL: <http://dx.doi.org/10.1080/10426914.2013.763968> (Zugriff am 19. September 2022).

Singh, Gurjeet, M.K. Pradhan & Ajay Verma. „Multi response optimization of injection moulding process parameters to reduce cycle time and warpage.“ *materialstoday: proceedings* 5, Nr. 2 (2018): S. 8398-8405. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.534> (Zugriff am 19. September 2022).

Statistisches Bundesamt. *Anzahl der Unternehmen in der deutschen Kunststoffindustrie nach Sektoren im Jahr 2021.* Hrsg. von Statista, März 2022. URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/200619/umfrage/anzahl-der-unternehmen-in-der-deutschen-kunststoffindustrie-nach-branchensektoren/> (Zugriff am 19. September 2022).

Statistisches Bundesamt. *Umsatz der Branche Herstellung von Kunststoffen in Deutschland von 2012 bis 2019 und Prognose bis zum Jahr 2025 (in Milliarden Euro).* Hrsg. von Statista, Juli 2021. URL: <https://de.statista.com/prognosen/313712/herstellung-von-kunststoffen-umsatz-in-deutschland> (Zugriff am 19. September 2022).

Wortberg, J., R. Michels & M. Neumann. *Energieeinsparpotentiale in der kunststoffverarbeitenden Industrie.* Hrsg. von Fraunhofer Institut Systemtechnik und Innovationsforschung, o. D. URL: https://www.energieverbraucher.de/files_db/dl mg_1079558567.pdf (Zugriff am 19. September 2022).

ZEW. *Anteil der Unternehmen mit kostensenkenden Prozessinnovationen in der Gummi- und Kunststoffverarbeitung in Deutschland in den Jahren 2008 bis 2020.* Hrsg. von Statista, Januar 2022. URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/420690/umfrage/unternehmen-in-der-kunststoffindustrie-mit-kostensenkenden-prozessinnovationen/> (Zugriff am 19. September 2022).

ZEW. *Kostensenkungsanteil in der Gummi- und Kunststoffverarbeitung in Deutschland durch Prozessinnovationen in den Jahren von 2008 bis 2020.* Hrsg. von Statista, Januar 2022. URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/420716/umfrage/kostensenkung-in-der-gummi-und-kunststoffverarbeitung-durch-prozessinnovationen/> (Zugriff am 19. September 2022).

Abschlussbericht

- Kurzbericht -

Projekt: „OptiTemp“

Optimierung des Wärmeübergangs in Temperierungssystemen zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit

Ausführende Stelle:

Technische Hochschule Köln, Fakultät für Informatik und Ingenieurwissenschaften

Projektleitung:

Prof. Dr.-Ing. Denis Anders
Steinmüllerallee1, 51643 Gummersbach
Telefon: 02261-8196-6372
E-Mail: denis.anders@th-koeln.de

Förderkennzeichen: 13FH012PX8

Projektlaufzeit: 01.10.2019 bis 31.03.2023

Kurzdarstellung

In den letzten zwei Jahrzehnten war die Energieeffizienz ein zentrales Entwicklungsziel in der Spritzgießtechnologie. Dabei steht insbesondere die Werkzeugtemperierung im Fokus, da sie einen entscheidenden Einfluss auf die Energieeinsparungen im Spritzgießprozess hat. Die Optimierung des Wärmeübergangs im Temperierkanal des Werkzeugs ist von großer Bedeutung. Ein verbessertes Wärmeübergangsverhalten kann zu erheblichen Energieeinsparungen führen, sowohl bei der Kühlung des Temperierfluids als auch bei der Zykluszeitverkürzung. Dieses Projekt zielt darauf ab, zwei Optimierungsansätze zu untersuchen: den Einsatz statischer Mischelemente in den Temperierkanälen und die Anwendung von Pulsationsströmung. Diese Ansätze sollen nicht nur den Energieverbrauch reduzieren, sondern auch die Ablagerungsbildung minimieren. Ein interdisziplinäres Konsortium, bestehend aus Forschungseinrichtungen und Industriepartnern, wurde gebildet, um dieses Thema umfassend anzugehen.

Aufgabenstellung

Das Projekt hat zwei Hauptziele. Es sollten statische Mischelemente in den Temperierkanälen optimiert werden, um einen verbesserten Wärmeübergang bei geringem Druckbedarf und geringen Ablagerungen zu erzielen. Hierfür mussten Modelle entwickelt werden, um den Wärmeübergang bei der Verwendung dieser Mischelemente zu simulieren. Des Weiteren wurde die Anwendung von Pulsationsströmung zur Temperierung untersucht, insbesondere in Bezug auf die Vermeidung von Ablagerungen und eine potenzielle Reduzierung der Umweltauswirkungen durch den Verzicht auf chemische Behandlung des Temperierwassers.

Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Projektteam bestand aus Forschern mit Fachwissen in den Bereichen Wärmeübertragung, Strömungsmechanik, Kunststoffverarbeitung und Prozessoptimierung. Die Zusammenarbeit mit Industriepartnern ermöglichte den Zugang zu praxisnahen Erfahrungen und Technologieentwicklung.

Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt wurde Arbeitspakete unterteilt, die Entwicklung, Experimente und Validierungen umfassen. Dazu gehörten die Erweiterung von Versuchsständen, die Modellierung und Simulation, die Integration der Optimierungskonzepte in Spritzgießwerkzeuge, die Geometrieoptimierung der Mischelemente, die Konstruktion und Fertigung dieser Elemente, die Einbindung der Modelle in die Spritzgießsimulation, die Untersuchung von Ablagerungseffekten und die experimentelle Validierung unter Labor- und Produktionsbedingungen. Zusätzlich wurden Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen und ein Marketingkonzept entwickelt, um die Vermarktung der neuen Technologie zu fördern.

Wissenschaftliche und technische Ausgangssituation

Die Optimierungsansätze basierten auf früheren Forschungsergebnissen, die jedoch noch nicht in die Praxis umgesetzt wurden. Es fehlten numerische Modelle und Berechnungsmethoden für den Effekt der Mischelemente und der Pulsationsströmung auf den Wärmeübergang und den Druckbedarf in Temperiersystemen. Die Attraktivität dieser Ansätze lag in ihrer Einfachheit und den potenziellen

Kosteneinsparungen, insbesondere durch die Vermeidung von chemischer Behandlung des Temperierwassers.

Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Projektteam arbeitete eng mit Industriepartnern wie Jokey Holding GmbH & Co. KG, Simcon kunststofftechnische Software GmbH und STRIKO Verfahrenstechnik GmbH zusammen, um Praxiserfahrung und -einblicke in die Forschung einzubringen. Diese interdisziplinäre Zusammenarbeit stärkt das Projekt und ermöglicht eine umfassende Herangehensweise an die Herausforderungen der Spritzgießtechnologie.

Projektergebnisse

Im Verlauf dieses Projekts wurden Fortschritte erzielt, die auf die Entwicklung eines innovativen Konzepts zur Verbesserung von Wärmeübertragungssystemen abzielen. Im Fokus stand dabei die gezielte Erzeugung periodischer Schwingungen nahe der Eigenfrequenz des Fluidsystems und die Integration von statischen Mischern, um den Wärmeübergang zu optimieren. Diese Entwicklungen haben das Potenzial, die Effizienz und Leistung von Wärmeübertragungssystemen in verschiedenen Anwendungen erheblich zu steigern.

Um die gewünschten periodischen Schwingungen zu erzeugen, wurden Pulsationsgefäße mit Gaspolstern entwickelt und installiert, die pulsierende Flüssigkeitsbewegungen ermöglichten. Dabei wurden verschiedene Ansätze zur Pulsationserzeugung erforscht, darunter die Nutzung einer Kolbenmembranpumpe sowie die Entwicklung von zwei speziellen Pulsatoren: einem einseitig wirkenden Pulsationserzeuger und einem doppelseitig wirkenden Tandem-Pulsator. Die Pulsationsfrequenz konnte im Bereich von 0,5 bis 8 Hz variiert werden, wobei optimale Einstellparameter ermittelt wurden, um reproduzierbare Pulsationsströmungen zu generieren. Die Untersuchungen zum Wärmeübergang in inkompressiblen Rohrströmungen wurden durch die Integration von statischen Mischern erweitert. Diese trugen dazu bei, die Temperaturverteilung im Werkzeug zu homogenisieren und die mittlere Temperatur in der Kontaktfläche zur Schmelze signifikant zu reduzieren. Zudem zeigten transiente Berechnungen der Simulation von Spritzgusszyklen, dass der Einsatz von Mischern die Zykluszeit erheblich verkürzen kann. Die Auswirkungen verschiedener Parameter, wie beispielsweise Fließgeschwindigkeit, Wärmeleitfähigkeit und Wärmestromdichte des Werkzeugstahls, wurden ebenfalls bei den Untersuchungen umfassend berücksichtigt. Darüber hinaus konnten funktionale Zusammenhänge zwischen den Mischereigenschaften, der Temperatur und dem Druckverlust identifiziert werden. Zusätzlich wurde analysiert, wie sich Pulsationsströmungen in Temperiersystem auf die Kunststoffschmelze auswirken.

Die Ergebnisse dieses Projekts betonen das erhebliche Potenzial von periodischen Schwingungen durch Pulsationsgenerierung und statische Mischungen zur Verbesserung des Wärmeübergangs in Temperiersystemen des Spritzgießens. Diese vielversprechenden Optimierungen können in verschiedenen Anwendungen erhebliche Vorteile bieten und bilden einen wichtigen Schritt in Richtung effizienterer Wärmeübertragungssysteme.