

Masterthesis

Nr.MME/01/2025

Additiv hergestellte Formeinsätze mit integrierten Peltier-Elementen für die variotherme Prozessführung im Spritzgießverfahren

eingereicht bei der Fakultät Automobil- und Maschinenbau der Westsächsischen
Hochschule Zwickau am 30.07.2025

zur Erlangung des akademischen Grades eines

Master of Engineering

Vorgelegt von: cand. Master Dipl.-Ing.(FH) Collin Nicolas Mann

geb. am: 26.03.2000 in Lichtenstein

Studiengang: Master Mechatronik

Auftraggeber: Westsächsische Hochschule Zwickau

Prof. Dr.-Ing. Michael Heinrich

Abstract

Diese Masterarbeit untersucht die konzeptionelle Machbarkeit und die thermodynamische Auslegung einer adaptiven Peltier-Temperierung in additiv gefertigten Kunststoffform einsätzen für Spritzgießwerkzeuge. Ziel ist es, ein Peltier-System zur variothermen Werkzeugtemperierung zu integrieren und hinsichtlich seiner Leistungsfähigkeit zu bewerten.

Ausgehend von einer Analyse des Standes der Technik und aktueller Forschungsarbeiten zu Peltier-Systemen und additiv gefertigten Werkzeugen wurde ein Berechnungstool zur stationären Wärmebilanz polymerbasierter Form einsätze erstellt.

Simulationen und Experimente zeigten, dass klassische Kühlzeit-Formeln für Kunststoffwerkzeuge ungeeignet sind, die Schätzformel nach Gerke erwies sich als anwendbar. Versuche mit Peltier-Modulen in Stahlwerkzeugen zeigten eine Temperaturreduktion von ca. 2 K und bestätigten den prinzipiellen Effekt der Temperierung.

Die Integration eines Peltier-Moduls in ein Kunststoffwerkzeug belegte die Machbarkeit, offenbarte jedoch Defizite in der Festigkeit. Eine konturfolgende Peltier-Temperierung für eine Fließspirale scheiterte an Bauraum, Anordnung und Lötverbindungen, lieferte jedoch wertvolle Erkenntnisse zur Optimierung.

Prozessmessungen belegten temperaturinduzierte Verformungen und eine höhere Standzeit metallischer Einsätze. Zukünftig sind spezifische Auslegungsmethoden, bessere Werkstoffe und integrierte Regelkonzepte nötig.

Erklärung zur selbständigen Anfertigung der Masterarbeit

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit in allen Teilen selbstständig angefertigt und keine anderen als die in der Arbeit angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe, und dass die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form in noch keiner anderen Prüfung vorgelegen hat. Mir ist bewusst, dass ich Autor/in der vorliegenden Arbeit bin und volle Verantwortung für den Text trage.

Ich erkläre, dass ich wörtlich oder sinngemäß aus anderen Werken – dazu gehören auch Internetquellen – übernommene Inhalte als solche kenntlich gemacht und die entsprechenden Quellen angegeben habe.

Mir ist bewusst, dass meine Arbeit auf Plagiate überprüft werden kann. Mir ist bekannt, dass es sich bei der Abgabe eines Plagiats um ein schweres akademisches Fehlverhalten handelt und dass Täuschungen nach der für mich gültigen Prüfungsordnung geahndet werden.

Zusätzlich versichere ich, dass ich auf künstlicher Intelligenz (KI) basierende Werkzeuge nur in Absprache mit den Prüfern verwendet habe. Dabei stand meine eigene geistige Leistung im Vordergrund, und ich habe jederzeit den Prozess steuernd bearbeitet.

Diese Werkzeuge habe ich im Quellenverzeichnis in der Rubrik „Übersicht verwendeter Hilfsmittel“ mit ihrem Produktnamen und einer Übersicht des im Rahmen dieser Prüfungs-/Studienarbeit genutzten Funktionsumfangs unter Angabe der Textstelle in der Arbeit vollständig aufgeführt.

Ich versichere, dass ich keine KI-basierten Tools verwendet habe, deren Nutzung die Prüfer explizit schriftlich ausgeschlossen haben. Ich bin mir bewusst, dass die Verwendung von Texten oder anderen Inhalten und Produkten, die durch KI-basierte Tools generiert wurden, keine Garantie für deren Qualität darstellt.

Ich verantworte die Übernahme jeglicher von mir verwendeter maschinell generierter Passagen vollumfänglich selbst und trage die Verantwortung für eventuell durch die KI generierte fehlerhafte oder verzerrte Inhalte, fehlerhafte Referenzen, Verstöße gegen das Datenschutz- und Urheberrecht oder Plagiate.

Zwickau, am 30.07.2025


.....
Collin Nicolas Mann

Aufgabenstellung



Masteraufgabe

MME/01/2025

für Herrn Dipl.-Ing. (FH) Collin Mann
Studiengang Mechatronik

Tag der Ausgabe: 04.02.2025
Abgabetermin: 15.07.2025
Tag der Abgabe:

Erstprüfer/in: Prof. Dr.-Ing. Michael Heinrich
Zweitprüfer/in: Prof. Dr.-Ing. Martin Dannemann
Auftraggeber: Westsächsische Hochschule Zwickau

Thema

Additiv hergestellte Formeinsätze mit integrierten Peltierelementen für die variotherme Prozessführung in Spritzgießverfahren

Aufgabe

Die gezielte Kühlung von Formeinsätzen ist von entscheidender Bedeutung beim Spritzgießen, um die Bauteilfertigung hinsichtlich Qualität und Effizienz zu beeinflussen. Die Integration einer variothermen Temperierung auf Basis des Peltier-Effektes verspricht dabei neue Perspektiven für den Einsatz von additiv gefertigten Spritzgießformeinsätzen. Die thermoelektrische Applikation erlaubt eine präzise Temperaturkontrolle im Werkzeug. Die spezifischen Anwendungsmöglichkeiten in der variothermen Temperierung sind jedoch hinsichtlich neuer Fertigungsverfahren im Werkzeugbau (additive Fertigung) noch nicht umfassend erforscht.

Besonders bei Formeinsätzen aus Kunststoffen, bei denen eine konturnahe Kühlung herausfordernd ist, bieten sich durch die feste Verbindung der Peltierelemente neue Lösungsansätze. Diese Masterarbeit zielt darauf ab, das Potenzial des Peltier-Effekts im Kontext der additiven Fertigung von Formeinsätzen für Spritzgusswerkzeuge zu untersuchen. Durch diese Temperierungstechnik können u. a. in der Automobil-, Elektronik-, Medizin- und Luft- und Raumfahrtindustrie Prozesse optimiert werden, was zu einer verbesserten Produktqualität und Produktionsgeschwindigkeit führt.

Zielsetzung:

Im Rahmen der Arbeit sollen die spezifischen Anforderungen an eine variotherme Prozessführung erforscht und in ein innovatives Spritzgießwerkzeugkonzept überführt werden. In einer Machbarkeitsstudie ist es das Ziel, das funktionalisierte Werkzeug zu validieren und prozessbegleitende Kenngrößen (thermische und geometrische) zu analysieren.

Arbeitsschwerpunkte:

- Recherche des Standes der Technik und der Wissenschaft
- Abschätzende analytische thermische Auslegung des Formeinsatzes



- Konzeption eines formadaptiven Peltierelements
- Konstruktion der additiven Formeinsätze und Verbindungstechnik im Werkzeugträger
- Ausstattung des Formeinsatzes mit Sensorik zur Messung der Temperatur
- Potenzialabschätzung hinsichtlich: Designfreiheit, Systemgrenzen, Technologie
- Erprobung des Temperierungskonzeptes unter Laborbedingungen

Für die Anfertigung der Abschlussarbeit sind die Richtlinien der Fakultät Automobil- und Maschinenbau zu beachten. Wenn sich die Notwendigkeit ergibt, kann der Umfang der Aufgabenstellung vom ausgebenden Professor erweitert oder eingeschränkt werden. Veröffentlichungen über den Inhalt der Abschlussarbeit dürfen, sofern die Arbeit mit einem Sperrvermerk versehen wird, nur mit Zustimmung des Auftraggebers vorgenommen werden.

Prof. Dr.-Ing. Michael Heinrich
Betreuende/r Erstprüfer/in

Prof. Dr.-Ing. Andrea Kobylka
Vorsitzende des Prüfungsausschusses

Erstprüfer/in:

- ☒ digitale Abgabe
☐ gebundene Abgabe

Zweitprüfer/in:

- ☒ digitale Abgabe
☒ gebundene Abgabe

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meines Studiums der Mechatronik an der Westsächsische Hochschule Zwickau und befasst sich mit der Entwicklung und Untersuchung einer adaptiven Peltier-Temperierung in additiv gefertigten Kunststoffformensätzen für den Spritzgießprozess.

Motivation für diese Arbeit war der stetig wachsende Anspruch an Spritzgießwerkzeuge hinsichtlich kürzerer Zykluszeiten, höherer Bauteilqualität und flexiblerer Temperierungskonzepte. Gleichzeitig eröffnen additive Fertigungsverfahren neue Möglichkeiten in der Werkzeuggestaltung, deren Potenziale bislang noch nicht umfassend für variotherme Temperiersysteme genutzt werden. Die Verbindung dieser beiden Forschungsfelder – Additive Fertigung und Peltier-Temperierung – stellt einen innovativen Ansatz dar, dessen Machbarkeit und Grenzen es zu erproben gilt.

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr.-Ing. Michael Heinrich und Prof. Dr.-Ing. Martin Dannemann für die fachliche Unterstützung und die wertvollen Anregungen während der Bearbeitung. Ebenso danke ich dem Team der Professur Kunststofftechnik- und Verarbeitung im Labor für ihre Hilfe bei der Durchführung der Versuche im Labor und der Auswertung der Ergebnisse. Nicht zuletzt möchte ich meiner Familie und meinen Freunden für die Motivation und Unterstützung danken.

Ich hoffe, dass die in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse einen Beitrag zur Weiterentwicklung adaptiver Temperierungskonzepte leisten und als Grundlage für zukünftige Forschungs- und Entwicklungsarbeiten dienen können.

Zwickau, 30.07.2025

Collin Mann

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	1
2	VARIOTHERME PELTIERTEMPERIERUNG IN ADDITIV GEFERTIGTEN SPRITZGIEßFORMWERKZEUGEN	3
2.1	EINORDNUNG UND INDUSTRIELLE RELEVANZ.....	3
2.1.1	<i>Technologieablauf des Spritzgießprozesses.....</i>	<i>3</i>
2.1.2	<i>Aufbau eines Spritzgießwerkzeugs</i>	<i>6</i>
2.1.3	<i>Isotherme und variotherme Werkzeugtemperierung im Spritzgießverfahren</i>	<i>7</i>
2.1.4	<i>Auslegung des Temperiersystems im Spritzgießwerkzeug.....</i>	<i>11</i>
2.2	ADDITIVE FERTIGUNGSVERFAHREN IM KUNSTSTOFFWERKZEUGBAU	17
2.2.1	<i>Klassifikation additiver Fertigungsverfahren für Kunststoffe</i>	<i>17</i>
2.2.2	<i>Additive Fertigungsverfahren für den Kunststoffformenbau</i>	<i>18</i>
2.3	FUNKTIONSWEISE UND AUSLEGUNG VON PELTIER-ELEMENTEN.....	23
2.3.1	<i>Der Peltier-Effekt und seine physikalischen Grundlagen.....</i>	<i>23</i>
2.3.2	<i>Thermodynamische Auslegung von Peltier-Modulen für Spritzgießwerkzeuge.....</i>	<i>25</i>
2.3.3	<i>Wirkungsgrad und „Coefficient of Performance“</i>	<i>28</i>
3	STAND DER TECHNIK ADDITIV GEFERTIGTER FORMWERKZEUGE	29
3.1	AKTUELLE ENTWICKLUNGEN BEI ADDITIV HERGESTELLTEN FORMEINSÄTZEN AUS KUNSTSTOFF.....	29
3.1.1	<i>Anwendungsgebiete und -potenziale für den Einsatz additiv gefertigter Formwerkzeuge... 29</i>	
3.1.2	<i>Harz- und Filament-basierte additive Fertigungsverfahren für Kleinserienwerkzeugen</i>	<i>30</i>
3.1.3	<i>Herausforderung bei der Temperierung additiver Kunststoffformwerkzeuge.....</i>	<i>31</i>
3.1.4	<i>Gestaltungsrichtlinien für additive Kunststoffformwerkzeuge.....</i>	<i>32</i>
3.1.5	<i>Zusammenfassende Betrachtung additiver Formeinsätze im Kunststoffwerkzeugbau</i>	<i>33</i>
3.2	THERMOELEKTRISCHE WERKZEUGTEMPERIERUNG MITTELS PELTIER-TECHNOLOGIE.....	34
4	KONZEPTION EINES ADDITIV GEFERTIGTEN SPRITZGIEßWERKZEUGS MIT INTEGRIERTER PELTIER-TEMPERIERUNG	36
4.1	ENTWICKLUNG EINES FORMEINSATZES ZUR CHARAKTERISIERUNG DER FLIEßFÄHIGKEIT	36
4.2	WERKSTOFFAUSWAHL FÜR ADDITIV GEFERTIGTE FORMEINSÄTZE.....	38
4.3	THERMISCHE ANALYSE UND AUSLEGUNG DER TEMPERIERUNG IN ADDITIV GEFERTIGTEN SPRITZGIEßWERKZEUGEN 39	
4.3.1	<i>Analytische Berechnung der Kühlzeit.....</i>	<i>39</i>
4.3.2	<i>Numerische Berechnung der Kühlzeit.....</i>	<i>40</i>
4.3.3	<i>Thermische Bilanzierung des additiv gefertigten Werkzeugformeinsatzes.....</i>	<i>42</i>
4.3.4	<i>Entwurf und Integration einer Peltier-Element-Kühlung im Formwerkzeug.....</i>	<i>44</i>
5	FERTIGUNGSTECHNISCHE UMSETZUNG DES TRÄGERWERKZEUGES	45
6	EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG DER PELTIERKÜHLUNG IN ADDITIV GEFERTIGTEN KUNSTSTOFFFORMEINSÄTZEN	48
6.1	INTEGRATION DES PELTIER-MODULS	48
6.2	VERSUCHSAUFBAU UND BESTIMMUNG DER PROZESSPARAMETER.....	49
6.3	UNTERSUCHUNG DES TRANSIENTEN TEMPERATURVERLAUFS IM VARIOTHERMEN FORMEINSÄTZEN	51
7	ADAPTIVE PELTIER-KÜHLUNG IM SPRITZGIEßPROZESS.....	58



7.1	HERSTELLUNG DER FORMEINSÄTZE	58
7.2	ENTWICKLUNG DER ADAPTIVEN PELTIERKÜHLUNG	62
7.3	MONTAGE DER FORMEINLEGER IM TRÄGERWERKZEUG.....	67
7.4	UNTERSUCHUNGEN IM SPRITZGIEßPROZESS.....	68
8	DISKUSSION DER ERGEBNISSE DER VARIOTHERMEN PROZESSFÜHRUNG MIT HILFE EINES PELTIER-MODULES IN ADDITIVEN FORMEINSÄTZEN	74
8.1	VERGLEICH MIT TRADITIONELLEN KÜHL- UND HEIZMETHODEN.....	74
8.2	EINSATZ VON ADDITIVEN KUNSTSTOFFFORMEINSÄTZEN IM SPRITZGIEßEN	76
8.3	POTENTIALABSCHÄTZUNG DER PELTIER-TEMPERIERUNG IN ADDITIVEN KUNSTSTOFFFORMEINSÄTZEN.....	78
9	ZUSAMMENFASSUNG	80
10	LITERATUR.....	XIII

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erläuterung
ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol
AM	Additive Manufacturing
COP	Coefficient of Performance
DLP	Digital Light Process
DMD	Digital Micromirror Device
DPI	Dots per Inch
FDM	Fused Deposition Modeling
FFF	Fused Filament Fabrication
FLM	Fused Layer Modeling
LCD	Liquid Crystal Display
MEMS	Mikroelektromechanische Systeme
MJM	Multi-Jet-Modeling
PA	Polyamid
PC	Polycarbonat
PEEK	Polyetheretherketon
PEI	Polyetherimid
PJM	Poly-Jet-Modeling
PLA	Polylactide
SLA	Stereolithographie
TEC	Thermoelektrik Cooler
UV	Ultraviolett
VDI	Verband Deutscher Ingenieure

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Schematischer Aufbau einer Spritzgießmaschine	4
Abbildung 2:	Verfahrensablauf der Spritzgießprozesses	4
Abbildung 3:	Aufbau eines Zweiplattenwerkzeugs.....	6
Abbildung 4:	Ablauf des variothermen Spritzgießprozesses [8]	8
Abbildung 5:	Schritte der analytischen thermischen Berechnung	12
Abbildung 6:	Wärmestrombilanz im Spritzgießwerkzeug nach Kretschmar	15
Abbildung 7:	Verfahrensaufbau des Fused-Layer-Filament-Verfahrens	19
Abbildung 8:	Verfahrensaufbau Stereolithographie nach VDI 3405	20
Abbildung 9:	Verfahrensaufbau Digital Light Processing nach VDI 3405	21
Abbildung 10:	Verfahrensablauf Poly-Jet-Modeling nach VDI 3405	23
Abbildung 11:	Aufbau eines Peltier-Elementes	24
Abbildung 12:	Thermoelektrische Kennwerte diverser Materialien [36].....	25
Abbildung 13:	Fließspirale mit Anguss	37
Abbildung 14:	Formplatte Fließspirale	37
Abbildung 15:	Simulationsmodell in SolidWorks Plastics.....	42
Abbildung 16:	Außenansicht des Spritzgießwerkzeuges	45
Abbildung 17:	Aufbau der Angussseite des Trägerwerkzeugs	46
Abbildung 18:	Aufbau der Auswerferseite des Trägerwerkzeugs	47
Abbildung 19:	Plattenkavität auf der Auswerferseite	48
Abbildung 20:	Geometrie des Plattentestkörpers.....	48
Abbildung 21:	Rückseite der Angussseite	48
Abbildung 22:	Füllstudie des Plattenwerkzeuges	49
Abbildung 23:	Füllstudie des Plattenformeinsatz aus Stahl	50
Abbildung 24:	Versuchsaufbau zur Erprobung der Formeinsätze	51
Abbildung 25:	Temperaturverlauf des Stahleinsatzes bei 0,5 V und 20 °C	52
Abbildung 26:	Temperaturverlauf des Stahleinsatzes im Spritzgießzyklus	53
Abbildung 27:	Verformung des Formeinsatz an der Angussseite durch Überdruck .	54
Abbildung 28:	Additive Formeinsatz aus Rigid 10K.....	54
Abbildung 29:	Thermogramm des Formeinsatzes aus Rigid 10K	55
Abbildung 30:	Erzielbare Temperaturen des Peltier-Moduls.....	56
Abbildung 31:	Füllstudie des additiv gefertigten Plattenwerkzeuges	57
Abbildung 32:	Beschädigung des Peltier-Moduls im Formeinsatz aus Rigid 10K.....	57
Abbildung 33:	Fließspiralen Formeinsatz	58
Abbildung 34:	Positionierung des Formeinsatzes in Preform	59
Abbildung 35:	Fließspirale aus RIGID 10K.....	59
Abbildung 36:	Positionierung auf dem MJP-Drucker.....	60
Abbildung 37:	Fließspirale aus Visijet HT250.....	60

Abbildung 38:	Geometrievergleich der Formplatten nach der Herstellung.....	61
Abbildung 39:	Anordnung Peltier-Elemente im klassischen und adaptiven Design..	62
Abbildung 40:	Explosionsansicht adaptive Peltier-Temperierung	63
Abbildung 41:	Adaptives Temperierungselement	64
Abbildung 42:	Prüfstand zur Funktionsweise der Peltier-Temperierung	64
Abbildung 43:	kalte Seite des adaptiven Peltier-Moduls	65
Abbildung 44:	warme Seite des Peltier-Moduls	65
Abbildung 45:	Temperaturdifferenz bei unterschiedlichen Stromstärken	66
Abbildung 46:	Montierter Rigid 10K Formeinsatz	67
Abbildung 47:	Montage des adaptiven Peltier-Temperiersystems	68
Abbildung 48:	Thermogramme Fließspirale nach unterschiedlichen Kühlzeiten	69
Abbildung 49:	maximale Entformungstemperatur über 10 Zyklen	69
Abbildung 50:	Geometrievergleich des Stahl Formeinsatz nach 45 Zyklen	70
Abbildung 51:	Entformungstemperatur aus dem Rigid 10K-Formeinsatzs.....	71
Abbildung 52:	Messung der Geometrie nach 10 und 40 Zyklen.....	71
Abbildung 53:	Schadensbild des Visijet-HT-250 Formeinsatzes	72
Abbildung 54:	Fließspirale mit Fehlern aus PP	73

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Kühlzeitberechnung von Grundkörpern nach Menges	14
Tabelle 2:	Wärmeleitfähigkeit von Kunststoffen in der additiven Fertigung	38
Tabelle 3:	Thermische Eigenschaften ausgewählter Kunststoffe	39
Tabelle 4:	Analytischen Kühlzeitberechnung der Fließspirale	40
Tabelle 5:	Materialkennwerte für die numerische Kühlzeitberechnung	41
Tabelle 6:	Numerische Kühlzeitberechnung mit SolidWorks Plastics	42
Tabelle 7:	Wärmestrombilanz für einzelne Formkunststoffe	43
Tabelle 8:	Mögliche abzuführende Wärme bei gewählter Kühlzeit	43
Tabelle 9:	Benötigte Peltier-Elemente nach Werkstoff	44

Formelverzeichnis

(1) Temperaturleitfähigkeit.....	12
(2) Kühlzeit nach Hopemann	13
(3) max. Kontakttemperatur an der Werkzeugoberfläche.....	13
(4) Wärmeeindringfähigkeit	14
(5) Kühlzeitformel in der Praxis	14
(6) Wärmespeicherzahl.....	15
(7) Kühlzeitberechnung nach Gerke	15
(8) stationäre Wärmestrombilanz eines Spritzgießwerkzeuges	16
(9) eingebrachte Wärmemenge in das Spritzgießwerkzeug	16
(10) Wärmestrom durch Konvektion	16
(11) Wärmestrom durch Strahlung	16
(12) Wärmestrom durch Leitung.....	17
(13) Seebeck-Koeffizienten	26
(14) Figure of Merit eines Materials.....	26
(15) Figure of Merit in abhängigkeit der Temperatur	26
(16) Figure of Merit einer Materialkombination.....	26
(17) thermischer Leitwert.....	26
(18) Gesamtwärmefluss im Peltier-Element.....	27
(19) Wärmefluss von der heißen zur kalten Seite	27
(20) Wärmefluss von der kalten zur heißen Seite	27
(21) zugeführte elektrische Energie	27
(22) optimale Stromstärke eines Peltier-Elements	27
(23) Carnot-Wirkungsgrad eines Peltier-Elements.....	28
(24) Coefficient of Performance eines Peltier-Elements.....	28
(25) Schließkraft beim Spritzgießen	50

1 Einleitung

Die Temperaturführung von Formeinsätzen spielt im Spritzgießprozess eine zentrale Rolle, da sie maßgeblichen Einfluss auf Zykluszeit, Maßhaltigkeit, Oberflächenqualität und den Verzug der gefertigten Bauteile hat. Insbesondere die Kühlphase stellt einen kritischen Abschnitt innerhalb des Zyklus dar: Eine unzureichende oder inhomogene Kühlung führt zu inneren Spannungen, Formteilfehlern, erhöhter Ausschussquote und damit zu wirtschaftlichen Nachteilen. Für Anwendungen mit höchsten Anforderungen an Präzision und Reproduzierbarkeit – etwa in der Medizintechnik, Mikroelektronik oder Luftfahrt – ist daher eine präzise, steuerbare und idealerweise adaptive Temperaturführung essenziell. Nur eine exakt geregelte thermische Prozessstabilität ermöglicht kurze Zykluszeiten bei gleichzeitig hoher Bauteilqualität.

Parallel dazu gewinnt der Einsatz additiver Fertigungsverfahren im Werkzeugbau zunehmend an Bedeutung. Additiv gefertigte Formeinsätze bieten gegenüber konventionell hergestellten Werkzeugkomponenten wesentliche Vorteile: Sie lassen sich schnell, flexibel und kostengünstig produzieren und ermöglichen die Realisierung komplexer Geometrien, die mit herkömmlichen Verfahren nur eingeschränkt oder gar nicht umsetzbar sind. Insbesondere für Prototypenwerkzeuge und Kleinserien erweist sich die additive Fertigung als attraktive Option.

Ein vielversprechender Ansatz ist die Integration variothermer Temperiersysteme auf Basis des Peltier-Effekts. Thermoelektrische Module ermöglichen eine kompakte, medienlose und lokal steuerbare Temperierung. Aufgrund ihrer Fähigkeit, je nach Stromrichtung sowohl zu kühlen als auch zu heizen, eröffnen sie die Möglichkeit einer adaptiven und dynamischen Anpassung der Werkzeugtemperatur während des Spritzgießzyklus. Dies birgt das Potenzial, Kühlzeiten deutlich zu reduzieren und gleichzeitig Maßhaltigkeit und Oberflächenqualität zu steigern. Trotz dieses Potenzials existieren bislang jedoch nur wenige belastbare Konzepte und experimentelle Untersuchungen zur Integration von Peltier-Systemen in additiv gefertigte Formeinsätze. Herausforderungen ergeben sich insbesondere aus der begrenzten mechanischen Stabilität der eingesetzten Materialien, der Integration der Module in restriktive Bau-raumstrukturen sowie der thermodynamischen Auslegung des Gesamtsystems.

Vor diesem Hintergrund verfolgt die vorliegende Arbeit das Ziel, die Machbarkeit und das Potenzial einer adaptiven Peltier-Temperierung in additiv gefertigten Kunststoff-formeinsätzen systematisch zu untersuchen. Hierzu wird ein Konzept entwickelt, bei dem thermoelektrische Module in einen additiv gefertigten Formeinsatz integriert werden, um eine variotherme Temperierung zu realisieren. Im Rahmen einer Machbarkeitsstudie wird dieses Konzept experimentell erprobt und hinsichtlich zentraler thermischer und geometrischer Prozesskenngrößen bewertet. Die gewonnenen Erkenntnisse bilden die Grundlage für weiterführende Untersuchungen und zukünftige



Entwicklungen, mit denen die Vorteile additiver Fertigungsverfahren und innovativer Temperierungskonzepte kombiniert werden können, um die Leistungsfähigkeit von Spritzgießwerkzeugen nachhaltig zu verbessern.

Daraus leitet sich die zentrale Forschungsfrage ab: Inwieweit lassen sich aktive thermoelektrische Peltier-Module in additiv gefertigte Kunststoffwerkzeuge integrieren, und welche mechanischen sowie thermischen Faktoren bestimmen ihre Eignung für den praktischen Einsatz im Spritzgießprozess?

2 Variotherme Peltier-Temperierung in additiv gefertigten Spritzgießformwerkzeugen

2.1 Einordnung und industrielle Relevanz

Gemäß DIN 8580:2022-12 wird das Fertigungsverfahren Spritzgießen der 1. Hauptgruppe Urformen und der Untergruppe 1.2 Urformen aus dem plastischen Zustand zugeordnet [1]. Der Untergruppenname 1.2 Urformen aus dem plastischen Zustand beschreibt ein Verfahren, welches dazu dient, Werkstücke aus Kunststoffen in eine gewünschte Form durch einen Umformprozess zu überführen. Das beschriebene Fertigungsverfahren findet in einem geschlossenen Werkzeug statt, welches auf einer Spritzgießmaschine montiert ist. Die Geometrie des Bauteils wird innerhalb des Werkzeugs in Form einer Kavität hergestellt, welche in der Regel mittels subtraktivem Fertigungsverfahren (Fräsen oder Erodieren) hergestellt wird. Im Rahmen des Spritzgießverfahrens können Thermoplast, Duroplast oder Elastomere verarbeitet werden.

Diese Verfahren ermöglichen die wirtschaftliche Herstellung geometrisch nahezu beliebig komplexer Formteile in hohen Stückzahlen. Das Spritzgießen weist eine Reihe signifikanter Vorzüge bezüglich der Herstellung von Formteilen auf. Hierzu zählen insbesondere die direkte Transformation vom Rohstoff zum Formteil, eine minimale Nacharbeit der Teile, eine gute Automatisierbarkeit sowie geringe Stückkosten bei hohen Stückzahlen [2]. Beim Spritzgießen stehen eine Vielzahl von Prozessvarianten zur Verfügung, darunter das Umspritzen von eingelegten Teilen, das Erzeugen von Hohlräumen in Kunststoffteilen, das Spritzgießen von Schaumteilen sowie die Arbeit mit veränderbaren Hohlräumen während des Spritzgießens [3]. Auf Basis der hohen Verbreitung des Verfahrens wird in den folgenden Kapiteln ein kurzer Grundlagenüberblick über den Prozessablauf des Spritzgießens, den Aufbau von Werkzeugen und aktuelle Temperierungskonzepte gegeben. Im Anschluss erfolgt eine Einordnung innerhalb des Stands der Forschung von Temperierungskonzepten im Spritzgießwerkzeugbau.

2.1.1 Technologieablauf des Spritzgießprozesses

In diesem Kapitel wird der Prozessablauf des Spritzgießen von thermoplastischen Kunststoffen erörtert. Der Prozess des Spritzgießens wird auf einer Spritzgießmaschine ausgeführt, wie in Abbildung 1 dargestellt.

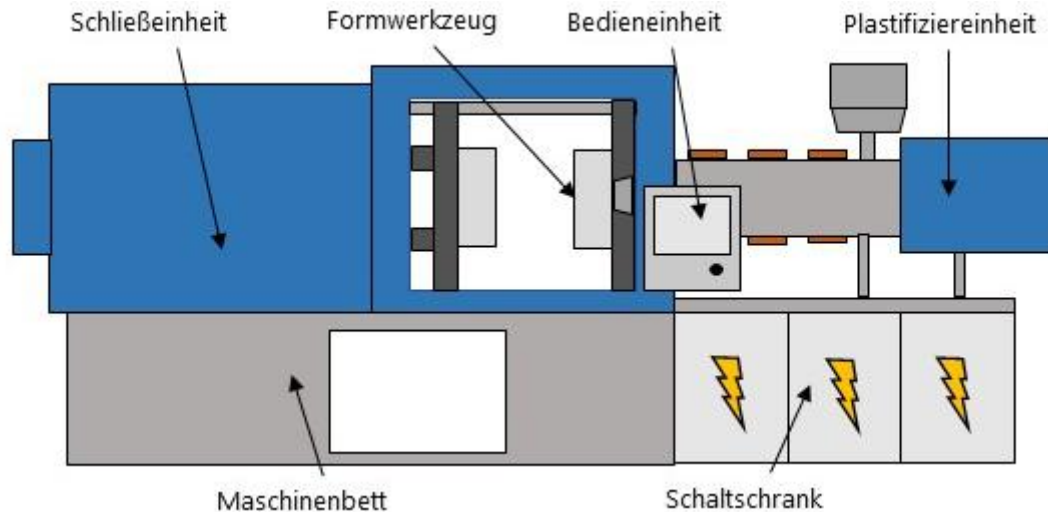


Abbildung 1: Schematischer Aufbau einer Spritzgießmaschine

Die Spritzgießmaschine ist aus dem Maschinenbett, der Schließereinheit, der Einspritz-
einheit und der Bedienung aufgebaut. Das Maschinenbett fungiert als Fundament für
die Kraftübertragung zwischen der Einspritzereinheit und der Schließereinheit sicher. Die
Einspritzereinheit überführt das feste Kunststoffgranulat durch Scherung und Erwärmung
in den schmelzflüssigen Zustand. Dies geschieht durch Wärmeeintrag über Heizbänder
und Scherung der Schmelze durch die Rotation der Schnecke. Die Formmasse wird
durch das Einspritzen mithilfe der Schnecke in die Kavität gefördert. Die Schnecke fun-
giert hierbei als Kolben. Die Schließereinheit hat die Aufgabe, das eingebaute Werkzeug
zu öffnen und zu schließen. Beim Schließen des Werkzeugs während des Füllvorgangs
wird die Schließereinheit mit Drücken bis zu 3000 bar belastet [4].

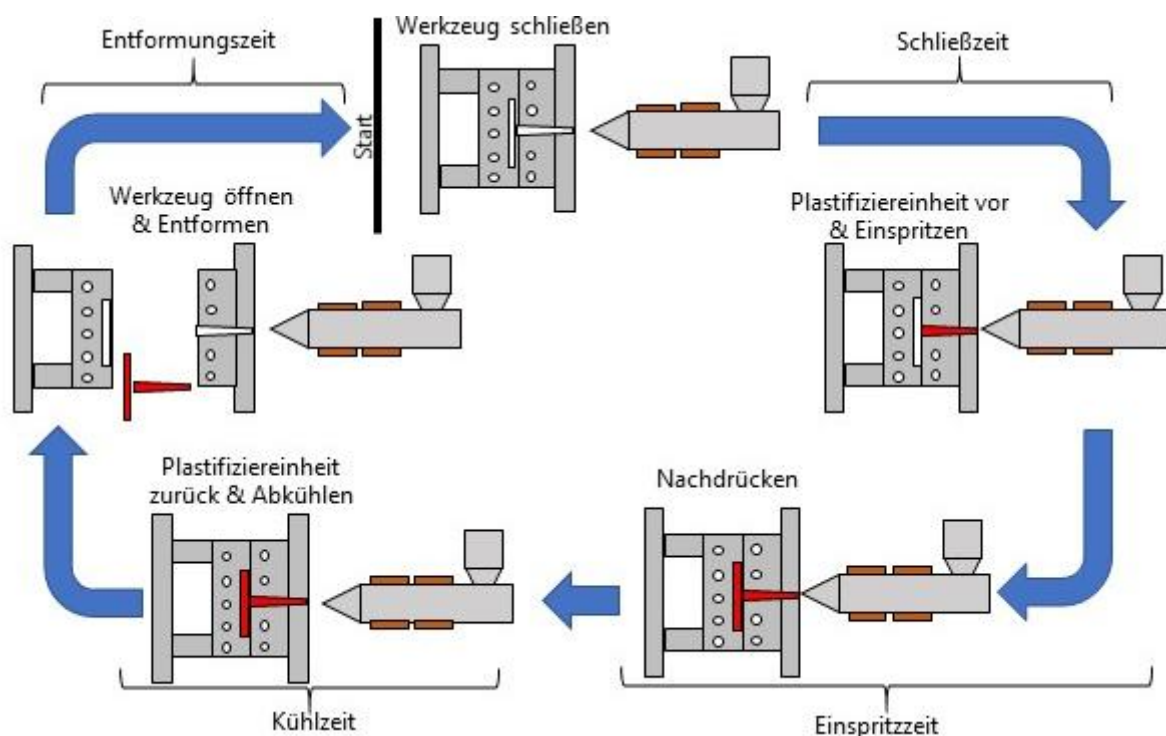


Abbildung 2: Verfahrensablauf der Spritzgießprozesses

Der Prozessablauf des Spritzgießens erfolgt in einem charakteristischen Zyklus und ist in Abbildung 2 dargestellt. Die Spritzgießmaschine wird über den Trichter der Spritzeinheit befüllt. Die gut rieselfähige Formmasse fällt direkt in die Gänge einer sich rotierende Schnecke. Die Schnecke fördert die Formmasse durch die von außen beheizten Zylinderzonen. Das Material wird durch Konvektion und Scherwärme aufgeschmolzen. An der Schneckenspitze muss der Kunststoff in den Schmelzzustand übergegangen sein. Durch die Förderung der Formmasse baut sich an der Schneckenspitze ein hoher Druck auf, der die Schnecke nach hinten drückt. Das Zurückfließen der Formmasse wird durch eine Rückstromsperre verhindert. Der Prozess der Materialaufschmelzung wird unterbrochen, sobald ein definierter Druck in der Spitze durch die Kunststoffschmelze erreicht ist. Eine Düse stellt die Verbindung zur Kavität her. Durch Druckbeaufschlagung des Kolbens wird die Form mit Kunststoffschmelze gefüllt [3]. Aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit von Kunststoffen ermöglicht dies das Fließen der heißen Schmelze in die Kavität. Die Wärmeleitung von der Formmasse in das Werkzeug führt zum Erstarren der Schmelze in der Kavität. Das Erstarren geht mit einem Zusammenziehen des Kunststoffes und einer geringen Formfüllung einher. Zur Kompensation dieser Schwindung des Bauteils wird mit dem sogenannten Nachdruck zusätzliche Schmelze in die Kavität gefördert. Die Nachdruckphase wird so lange aufrechterhalten, bis der Anguss erstarrt ist [4].

Während der Kühlzeit kommt es zum Schmelzen der neuen Formmasse in der Einspritzeinheit, was wiederum eine Bewegung der Schnecke nach hinten verursacht. Wird die hintere Dosiereinstellung durch die Schnecke erreicht, so wird der Vorgang beendet. Nach dem Ablauf der Kühlzeit wird die Schließeinheit mit dem montierten Werkzeug geöffnet und das Bauteil wird ausgeworfen. Zur Entformung der Bauteile aus dem Werkzeug finden hydraulische, mechanische oder pneumatische Auswerfermechanismen Anwendung. In der finalen Phase des Prozesses kommt es entweder zum Herabfallen der Bauteile oder zur Entnahme mittels eines Handhabungsmechanismus [3]. Der sich wiederholende Prozessablauf wird als Zyklus bezeichnet. Die Ermittlung der Zykluszeit für eine Füllung des Formnestes erfolgt durch die Addition der Zeitanteile des Verfahrens. Die vier wesentlichsten Zeitanteile sind in Abbildung 2 eingetragen.

Das Ziel des Spritzgießverfahrens besteht darin, in einem kurzen Zeitraum eine möglichst große Anzahl an Teilen mit hoher Qualität zu fertigen. Für den Erfolg des Spritzgießverfahrens ist eine fertigungsgerechte Auslegung des Bauteils sowie eine anforderungsgerechte Auslegung des Spritzgießwerkzeugs von entscheidender Bedeutung [5].

2.1.2 Aufbau eines Spritzgießwerkzeugs

Das Spritzgießwerkzeug stellt eine entscheidende technologische Komponente dar, die maßgeblich zum erfolgreichen Betrieb des Spritzgießprozesses beiträgt. Die Funktion des Werkzeugs besteht darin, das aufgeschmolzene Material in die Kavität zu leiten und diese auszufüllen. Darüber hinaus ist es essenziell, die Masse bis zur Entformungstemperatur abzukühlen und die hergestellten Teile nach der Abkühlzeit zu entformen [6]. Die Anforderungen, die an das Werkzeug gestellt werden, umfassen die Oberflächengüte der Kavität, die Belastbarkeit, die geforderte Zykluszeit, die Stückzahl, die Maßhaltigkeit und den Automatisierungsgrad [7]. Die Anforderungen resultieren in einer Vielzahl unterschiedlicher Werkzeugtypen, die anhand spezifischer Merkmale wie der Art des Angussystems, der Anzahl der Kavitäten, der Anzahl der Trennebenen und der Art der Entformung klassifiziert werden können [6]. Die Abbildung 3 veranschaulicht den grundlegenden Aufbau eines Zweiplattenwerkzeugs.

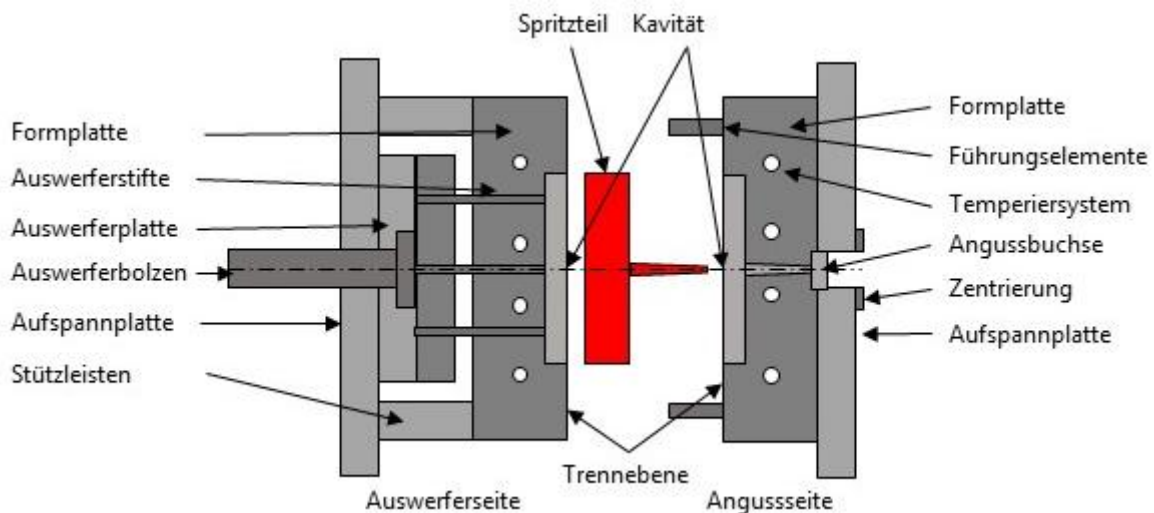


Abbildung 3: Aufbau eines Zweiplattenwerkzeugs

Das Werkzeug wird an der Trennebene in eine Angussseite und Auswerferseite geteilt. Die Montage der Angussseite erfolgt auf der festen Aufspannplatte der Schließereinheit. Die Ausrichtung des Werkzeuges auf den Aufspannplatten erfolgt durch beidseitige Zentrierringe. Die als Werkzeugaufspannplatte bezeichneten Elemente sind Träger der einzelnen Komponenten des Werkzeugs, zu denen beispielsweise die Formplatten oder die Kavitäten zählen. Die Angussbuchse ist auf der Angussseite positioniert und leitet die flüssige Schmelze von der Einspritzeinheit in die Kavität. Des Weiteren befinden sich auf der Angussseite das Anguss- und Kühlsystem. Die Realisierung des passgenauen Schließens des Werkzeugs erfolgt durch die Verwendung von Führungsstiften.

Die Auswerferseite wird auf der gegenüberliegenden, beweglichen Aufspannplatte montiert. Die zweite Werkzeughälfte trägt den fehlenden Teil der Kavität. Des Weiteren ist auf dieser Werkzeughälfte das Auswerfersystem positioniert, dessen Funktion in der

Entformung der Formteile aus dem Werkzeug besteht. Die Realisierung erfolgt durch Auswerferstifte. Die im Auswerferpaket gebündelten Stifte werden durch eine Kuppelung oder Ausstoßführung betätigt und somit die Teile entformt. Die Konstruktion ermöglicht eine Bewegung des Auswerfersystems. Zu diesem Zweck wird die Kavität der Auswerferseite auf zwei Stützleisten montiert. Die Auslegung von Werkzeugen kann in drei Teilbereiche unterteilt werden: die mechanische Auslegung, die rheologische Auslegung und die thermische Auslegung [4].

Im Rahmen des Spritzgießprozesses sind die Werkzeuge signifikanten Prozesskräften ausgesetzt. Die mechanische Auslegung ist eine unabdingbare Voraussetzung für die spätere sichere Funktion des Werkzeugs. Um die erforderlichen konstruktiven Maßnahmen ermitteln zu können, ist eine Analyse und Bewertung der mechanischen Belastungen erforderlich. Zu den wirkenden Kräften zählen Schließ- und Zuhaltekräfte, der durch die Formmasse und das Angussystem erzeugte Einspritzdruck sowie die Auswerferkräfte [3].

Die rheologische Auslegung befasst sich mit der Vorhersage des Abkühlverhaltens eines Bauteils sowie der Schwindungs- und Bindenahtvorhersage und der Abkühlung der Formmasse. Die rheologischen Untersuchungen erfolgen in der Regel in einem Simulationssoftwaresystem, das auf der Grundlage von Teilegeometrie und verwendeten Werkstoffen konzipiert ist. Anhand dieser Erkenntnisse besteht die Möglichkeit, die Temperierung konturnah zu konzipieren [7].

Die thermische Auslegung erfolgt auf Basis der mechanischen und rheologischen Auslegung. Diese beeinflusst die Temperaturverhältnisse des Werkzeuges und somit die Kühl-/Heizzeiten. Die Kühlzeit stellt den größten Teil der Zykluszeit dar und übt folglich einen signifikanten Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit eines Werkzeugs aus [3]. Im nachfolgenden Kapitel werden die thermischen Vorgänge erörtert, die Methoden ihrer analytischen Auslegung dargelegt und die in der Praxis verwendeten Temperierungskonzepte vorgestellt.

2.1.3 Isotherme und variotherme Werkzeugtemperierung im Spritzgießverfahren

Die Wirtschaftlichkeit eines Werkzeuges wird maßgeblich durch die Zykluszeit determiniert. Die Zykluszeit ist abhängig von der abzuführenden Wärmemenge, die durch die Formmasse eingebracht wird. Die Temperatur der Schmelze, die Entformungstemperatur sowie der spezifische Wärmehalt der Formmasse beeinflussen diese Wärmemenge. Der Wärmeeintrag beim Heizen sowie der Wärmeabtransport beim Kühlen werden durch ein Kanalsystem realisiert, in dem ein Kühlmedium zirkuliert [7]. Die Spritzgießwerkzeugtemperierung kann sowohl als isotherme als auch als variotherme

Prozesskühlung zum Einsatz kommen. Im Rahmen der isothermen Temperierung von thermoplastischen Polymeren wird eine möglichst konstante Werkzeugwandtemperatur angestrebt. Der Temperaturverlauf des Werkzeugs während des Spritzgießprozesses wird durch die eingebrachte thermische Energie zum Zeitpunkt des Einspritzens der Formmasse in die Kavität bestimmt.

Demgegenüber erfolgt bei der variothermen Prozessführung eine Erhöhung der Temperatur bis zum Einspritzen auf eine vorgegebene obere Grenztemperatur. Im Zuge des Einspritzungsprozesses erfolgt eine Temperaturänderung der Kühlflüssigkeit, mit dem Ziel, der Formmasse möglichst zeitnah Wärme zu entziehen. Für das Öffnen und Schließen des Werkzeugs ist keine spezifische Anpassung der Temperatur notwendig. Nach Durchlaufen einer Zykluszeit beginnt der Temperierungsprozess erneut. Ein Beispiel für einen solchen Prozess zur Verarbeitung eines thermoplastischen Kunststoffes ist in Abbildung 4 dargestellt.

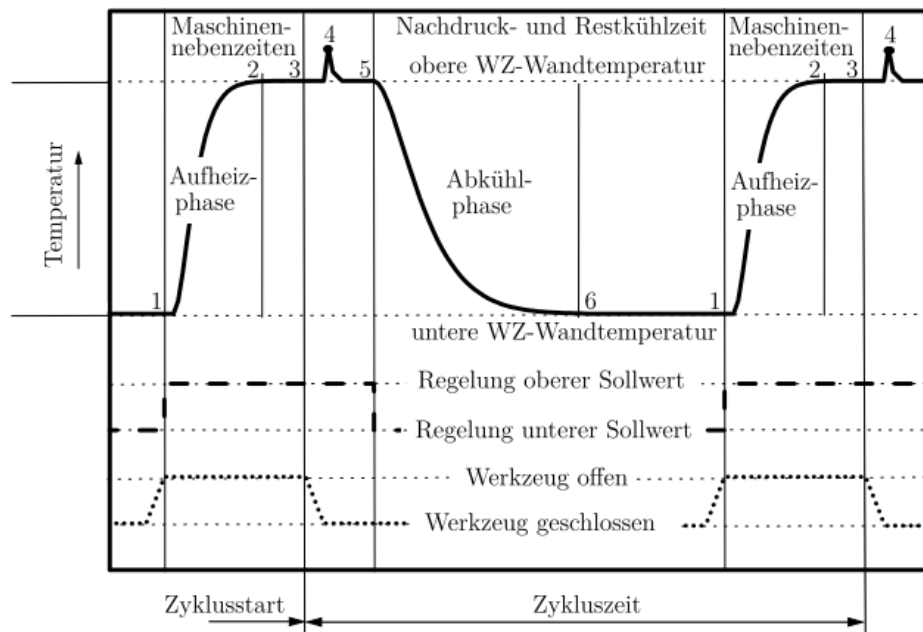


Abbildung 4: Ablauf des variothermen Spritzgießprozesses [8]

Die Einhaltung der Temperaturverhältnisse im Werkzeug hat einen entscheidenden Einfluss auf die Qualität des Bauteils, insbesondere in Bezug auf die Maßhaltigkeit, Haptik, Optik und das Schwindungsverhalten [9] [10].

In einigen Formteilmereichen erschwert ist die Kühlung aufgrund ungünstiger geometrischer Verhältnisse erschwert. Als Beispiel können Formteilecken angeführt werden. Eine Überhitzung der Bereiche resultiert in einer Verlagerung der Schmelze und in der Folge in Bauteilfehlern [3].

Aus diesem Grund ist das Temperierungskonzept spezifisch auf das zu fertigende Bauteil auszulegen. In Anbetracht des spezifischen Charakters der Temperierlösungen erfolgt eine Klassifizierung in die Kategorien Flächenkühlung, Kernkühlung und kontur-nahe Kühlung [2]

Die flächige Kühlung stellt die an der weitesten verbreiteten Form der Temperierung von Spritzgießwerkzeugen dar. Die flächige Kühlung des Werkzeugs wird durch das Einbringen von Bohrungen in die Formplatten auf der Anguss- bzw. Auswerferseite realisiert. Als Temperierungsmedium werden Wasser oder Öl verwendet. Die Temperierung des Mediums erfolgt mittels eines Temperierungsgeräts, welches die Temperatur und die Durchflussmenge des Mediums durch das Werkzeug reguliert. Gemäß dem aktuellen Stand der Technik besteht die Möglichkeit, die Auslegung der Kühlkanäle in serieller oder paralleler Ausführung mit ein oder mehreren Ein- und Ausgängen zu konzipieren. Diese Methode findet häufig Anwendung, da sie mittels subtraktiver Verfahren kostengünstig umgesetzt werden kann [4]. Die Fabrikation von runden Platten, die einen geringen Verzug aufweist, erfordert ein Kühlkanalsystem, das einer Spiralforn entspricht. Dieses ermöglicht eine homogene Temperierung vom Anguss bis zum äußeren Bereich, da am Anguss die Hauptmenge der Energie aufgenommen werden kann und das Kühlmedium nach außen hin eine geringere Menge an Energie aufnehmen muss. Die vorliegende Methode findet Anwendung in der Herstellung von Zahnrädern sowie Datenträgern [2].

Die Produktion von Formteilen, die einen signifikanten Hohlraum aufweisen und folglich einen Gießkern in der Form erfordern, bedingt den Einsatz spezifischer Kühlkonzepte. Ein Beispiel für ein solches Kühlkonzept ist die sogenannte Kernkühlung. Ein Beispiel für die Verwendung von Kunststoff ist die Herstellung von Spritzen und Bechern. Die Erzeugung eines gleichmäßigen Wärmestroms innerhalb des Werkzeugs wird durch den benötigten Kern erschwert. Aufgrund der unterschiedlichen Abkühlzeiten können maßliche Abweichungen und eine Reduzierung der Wirtschaftlichkeit entstehen [2]

Zur Lösung dieses Problems wurden zahlreiche Lösungsansätze erarbeitet, die im Folgenden in Kürze vorgestellt werden sollen. Die Abkühlung von Kernen mit sehr kleinem Durchmesser kann durch das Leiten von Druckluft und CO₂ durch kleine Bohrungen erfolgen. Gemäß dem vorliegenden Patent mit dem Namen „PLASTINUM™ Temp S: Spot Cooling mit CO₂ der Linde Aktiengesellschaft und der ISK GmbH wird das Konzept genutzt, um Bauteile an kritischen Geometrien zu heizen und zu kühlen [11]. Der entscheidende Vorteil dieses Verfahrens besteht darin, dass der Wärmetransport in kleinen Volumina durch das Gas realisiert werden kann. Dies ist bei Fluid-Lösungen lediglich unter hohem Druck möglich. Gemäß den Ergebnissen weiterer

Untersuchungen konnte eine Reduktion der Abkühlzeit um 60 % durch die exakte Steuerung von Gas-Impulsen erzielt werden. Darüber hinaus besteht nach wie vor ein signifikanter Forschungsbedarf hinsichtlich der simultanen Anwendung mehrerer Kühlkapillaren [12].

Die Verwendung von Kernen mit einer Größe von mehr als 8 mm erlaubt zudem den Einsatz von Fluidkühlungskonzepten. Zu diesem Zweck wird eine Bohrung in den Kern eingebracht und innerhalb des Wasserlaufes Trennbleche installiert. Die Entwicklung der Geometrie ist Gegenstand intensiver Forschungen. Den Untersuchungen von Anders zufolge üben statische Fluidmischer innerhalb von Kühlkanälen einen marginalen Einfluss auf die Kühlleistung bei kurzen Zykluszeiten aus. Im Gegensatz dazu konnte festgestellt werden, dass der Einsatz von statischen Mixern bei längeren Spritzzyklen und großen Serien zu einer Reduzierung der Fertigungszeit führen kann [13].

Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, Wärmeleiter aus wärmeleitfähigen Materialien, wie beispielsweise Kupfer, zu verwenden. Dies ermöglicht einen schnelleren Abtransport der Wärmeenergie aus der Kavität. K-Prashanth hat den Einfluss des Kernmaterials untersucht und dabei festgestellt, dass sich die Zykluszeit und der Verzug durch den Einsatz von Wärmeleitern signifikant reduzieren lassen [14].

Die Erreichung einer präzisen Temperierung der Kerne kann durch den Einsatz von Heatpipes realisiert werden. Heatpipes sind definiert als geschlossene Rohre, die mit einer Flüssigkeit gefüllt sind. Bei hohen Temperaturen beginnt die Flüssigkeit zu verdampfen. Dieser Effekt resultiert in der Aufnahme von Wärme und dem darauffolgenden Transport des Gases zur Wärmesenke. An der Wärmesenke kondensiert das Gas und gibt die Wärme an die umliegende Werkzeugstruktur ab. Die Verwendung von Heat-Pipes ermöglicht den Transport von Wärme aus dem Kern an die von außen besser erreichbaren Wärmesenken. Die Entwicklung von strukturintegrierten Heatpipes ermöglichte eine Vereinfachung der Geometrien und in der Folge eine Reduzierung der Werkzeugkosten [15].

Im Rahmen der Temperierung von Werkzeugkernen finden auch elektrische thermische Widerstandselemente und Peltier-Elemente Anwendung. Thermische Widerstandselemente ermöglichen die gezielte Erwärmung der Kavität [3]. Untersuchungen haben ergeben, dass der Einsatz elektrischer Temperiersysteme zu einer Optimierung der rheologischen Eigenschaften beim Füllen der Kavität führt. Der Einsatz von Peltier-Elementen ermöglicht die Realisierung ähnlicher Anwendungen. Diese Elemente zeichnen sich durch die Eigenschaft aus, thermische Energie bereitzustellen oder abzutransportieren. Die vorliegende Methode gestattet eine exakte Temperatursteuerung, die sich an den geforderten Prozessparametern orientiert [16]

Der gegenwärtige Trend zu komplexeren, topologisch optimierten Bauteilgeometrien bedingt gesteigerte thermische Anforderungen. In der Folge wird der Versuch unternommen, durch konturnahe Kühlung adaptive Kühlkonzepte zu implementieren, um eine gleichmäßige Temperierung zu gewährleisten. Der Einsatz neuartiger Simulationstools und additiver Fertigungsverfahren erlaubt die Entwicklung einer neuen, organischen Wegführung der Kühlstruktur an kritischen Bauteilstellen. Die Simulation und Erprobung von konturnahen Kühlungen ist Gegenstand zahlreicher wissenschaftlicher Untersuchungen. Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass die Führung konturnaher Kanäle unter anderem anhand von Vorbildern von Pflanzenwurzeln erfolgt [17].

Die Anwendung von AM-Verfahren erlaubt die Fabrikation von Support- und Lattice-Strukturen innerhalb von Kühlkanälen. Die Verstärkung der Kühlkanäle könnte eine Verringerung des Abstandes zwischen Kühlkanal und Kavität ermöglichen. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, den Durchmesser der Kanäle zu erhöhen. Die Reduzierung der Kühlzeit ist die Folge dieser Anpassungen [18]. Im Rahmen der Erprobung der konturnahen Kühlung wurde eine hohe Anzahl an Spritzgießzyklen durchlaufen. Die geringen Einsparungen an Kühlzeit in einem Zyklus führten in der Summe zu einer signifikanten Reduzierung um 50 % im Vergleich zu herkömmlichen Kühlsystemen [19].

Im industriellen Kontext findet eine Vielzahl von Kombinationen der erläuterten Methoden Anwendung, die jeweils zur schnellen Temperierung der Werkzeugform eingesetzt werden.

2.1.4 Auslegung des Temperiersystems im Spritzgießwerkzeug

Die thermische Auslegung eines Spritzgießwerkzeuges kann in einem zwei- oder dreidimensionalen Raum erfolgen. Die zweidimensionale Betrachtung erlaubt eine Abschätzung des thermischen Verhältnisses im Inneren eines Spritzgießwerkzeugs mit einer hohen Näherungsgenauigkeit. Die mathematische Lösung des zweidimensionalen Ansatzes ist analytisch möglich. Die dreidimensionale Betrachtung ermöglicht die korrekte Berechnung der Temperaturverhältnisse eines Spritzgießwerkzeuges unter Berücksichtigung aller thermischen, geometrischen und prozesstechnischer Einflüsse in Abhängigkeit von der Zeit. Die Lösung dieser Berechnung erfolgt numerisch und kann mittels einer Finite-Element-Methode simuliert werden. Kretschmar entwickelte einen analytischen Berechnungsablauf zur Abschätzung der Kühlzeit für ein zweidimensionales Bauteil. Die einzelnen Schritte sind gemäß Abbildung 5 in 6 Schritte untergliedert [20]. Im Folgenden werden die Schrittfolge sowie die analytische thermische Berechnung nach Hopmann et al. zur Abschätzung herangezogen [2].

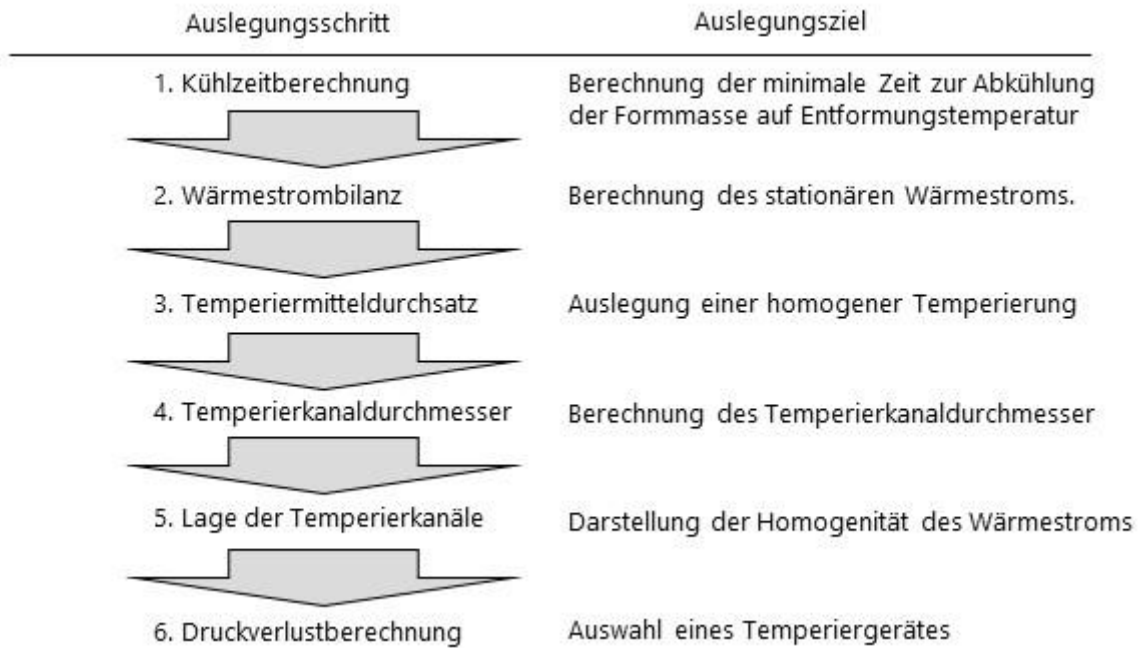


Abbildung 5: Schritte der analytischen thermischen Berechnung

Beschreibung des Abkühlverhaltens von Kunststoffteilen im Spritzgießwerkzeug

Im Rahmen der thermischen Auslegung ist es zunächst erforderlich, die Kühlzeit des Bauteils zu ermitteln. Der Wärmeaustausch zwischen der Formmasse und dem Kühlmedium wird durch Wärmeleitung an der Werkzeugwand ermöglicht. Die Wärmeleitung an der Werkzeugwand wird durch die Fouriersche Differenzialgleichung beschrieben. Die Temperaturleitung innerhalb des Werkzeugs kann durch die Temperaturleitfähigkeit α gemäß Formel (1) beschrieben werden. Die Temperaturleitfähigkeit α ergibt sich demnach aus dem Quotienten der Wärmeleitfähigkeit λ und dem Produkt aus Dichte ρ sowie spezifischer Wärmekapazität c_p . Der vorliegende Materialkennwert gibt Aufschluss über die Schnelligkeit, mit der ein Material auf einer Temperaturänderung reagiert und somit Wärmemenge abtransportieren kann. Ein hoher Wert von α bedeutet, dass sich Wärme im Material rasch verteilt, während ein niedriger Wert auf eine träge Wärmeausbreitung hinweist.

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \quad (1)$$

α Temperaturleitfähigkeit

λ Wärmeleitfähigkeit

ρ Dichte

c_p spezifische Wärmeleitfähigkeit

Unter der Annahme, dass die Wärmeleitung innerhalb des Werkzeugs eindimensional erfolgt, die Formwandtemperatur nach dem Einspritzen konstant bleibt und die Temperaturleitfähigkeit des Materials über die Zeit unverändert ist, kann die Fouriersche Differentialgleichung zur Kühlzeitformel überführt werden. Die in Formel (2) dargestellte Kühlzeitformel gestattet die Berechnung der Kühlzeit t_k für ein plattenförmiges Bauteil unter idealisierten Randbedingungen. In der Formel repräsentiert s die größte Wanddicke im kritischen Bereich, α die Temperaturleitfähigkeit des Kunststoffes, ϑ_M die Formmasse-Temperatur unmittelbar nach dem Einspritzen, ϑ_E die Entformungstemperatur und ϑ_W die Werkzeugwandtemperatur.

Nach Ablauf der berechneten Kühlzeit ist die Temperatur im Bauteil so weit reduziert, dass es ohne Verformung oder Beschädigung entformt werden kann.

$$t_k = \frac{s^2}{\alpha \cdot \pi^2} \ln \left(\frac{8 \cdot (\vartheta_M - \vartheta_W)}{\pi^2 \cdot (\vartheta_E - \vartheta_W)} \right) \quad (2)$$

s Wanddicke im kritischen Bereich

α Temperaturleitfähigkeit des Kunststoffes

ϑ_M Temperatur der Formmasse

ϑ_E Temperatur Entformung

ϑ_W Temperatur Werkzeugwand

Zur genaueren Bestimmung der Temperatur an der Werkzeugwand während des Formgebungsprozesses kann die maximale Kontakttemperatur $\vartheta_{W_{\max}}$ herangezogen werden. Diese ergibt sich aus dem thermischen Verhältnis zwischen Schmelze und Werkzeugwand und wird durch die unterschiedliche Wärmeindringfähigkeit b beider Materialien bestimmt. Die Berechnung erfolgt gemäß Formel (3):

$$\vartheta_{W_{\max}} = \frac{b_K \cdot \vartheta_{K0} + b_W \cdot \vartheta_{W0}}{b_K + b_W} \quad (3)$$

b_K Wärmeeindringfähigkeit Kunststofftemperatur

ϑ_{K0} Kunststofftemperatur vor dem Kontakt

b_W Wärmeeindringfähigkeit der Werkzeugwandtemperatur

ϑ_{W0} Werkzeugwandtemperatur vor dem Kontakt

Die Wärmeindringfähigkeit b in Formel (4) stellt einen Kennwert dar, welcher die Fähigkeit eines Materials beschreibt, Wärme bei Kontakt aufzunehmen oder abzugeben. Sie wird als Reaktion auf einen plötzlichen Temperaturunterschied an der Oberfläche des Materials definiert. Ein hoher Wert der Wärmeindringfähigkeit bedeutet, dass ein

Material bei Kontakt mit einem wärmeren oder kälteren Medium rasch thermisch reagiert. In der Kunststoffverarbeitung ist dieser Wert von besonderer Relevanz, da er das Temperaturverhalten an der Werkzeugwand bei der Formfüllung und Kühlung maßgeblich beeinflusst.

$$b = \sqrt{\rho \cdot \lambda \cdot c} \quad (4)$$

ρ Dichte

λ Wärmeleitfähigkeit

c spezifische Wärmekapazität

Menges erweiterte die Kühlzeitberechnung für andere geometrische Grundkörper deren Berechnung in Tabelle 1 dargestellt ist [21].

Tabelle 1: Kühlzeitberechnung von Grundkörpern nach Menges

Grundkörper	Formel der Kühlzeit
Zylinder	$t_k = \frac{D^2}{23.14 \cdot \alpha} \ln \left(0,692 \frac{(\vartheta_M - \vartheta_W)}{(\vartheta_E - \vartheta_W)} \right)$
Würfel	$t_k = \frac{h^2}{3 \cdot \pi^2 \cdot \alpha} \ln \left(0,533 \frac{(\vartheta_M - \vartheta_W)}{(\vartheta_E - \vartheta_W)} \right)$
Kugel	$t_k = \frac{D^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot \alpha} \ln \left(2 \cdot \frac{(\vartheta_M - \vartheta_W)}{(\vartheta_E - \vartheta_W)} \right)$

In der Praxis findet für die Prognose der Kühlzeit von thermoplastischen Kunststoffen in Stahlwerkzeugen eine unkomplizierte Beziehung Anwendung. Die Formel beschreibt die Abkühlzeit im Spritzgießprozess. Dabei ist c_k eine konstante, material- und prozessabhängige Größe und s stellt die Wanddicke des Bauteils dar. Es zeigt sich, dass die Abkühlzeit quadratisch mit der Wanddicke wächst. Dies bedeutet, dass dickere Bauteile erheblich länger zum Abkühlen benötigen als dünnere. Die Variable weist in Abhängigkeit vom Prozess eine Wertebandbreite von 2 bis 3 s/mm² auf.

$$t_k = c_k \cdot s^2 \quad (5)$$

Untersuchungen von Gerke ergaben, dass die praktische Formel lediglich für Stahlwerkzeuge anwendbar ist. Diese führt bei der Abschätzung der Kühlzeit von Kunststoffform einsätzen zu einem Fehler von über 50 %. Entsprechend wurde eine Abschätzung der t_k für Kunststoffwerkzeuge, die deutlich schlechtere thermische Eigenschaften aufweisen, experimentell hergeleitet. Die Formel (7) gestattet die Abschätzung der Kühlzeit für Rapid-Tooling-Werkzeuge mit einer Wärmespeicherzahl S zwischen 1000 und 4500 kJ/K m³ und einer Bauteildicke von 0,5 bis 4 mm. Die Wärmespeicherzahl S ist ein Maß für die Fähigkeit eines Materials, Wärme zu speichern. Sie wird nach Formel (6)

berechnet, indem die Dichte des Werkzeugmaterials mit der spezifischen Wärmekapazität c_p multipliziert wird.

$$S = c_p \cdot \rho \quad (6)$$

c_p spezifische Wärmekapazität Werkzeugwerkstoff

ρ Dichte Werkzeugwerkstoff

Die Resultate der durchgeführten Simulationen ergaben, dass eine Reduzierung der Abweichung der Kühlzeit um 24 Prozent erreicht werden konnte.

$$t_k = \left(1 + \frac{0,01 \cdot c_p \cdot \rho + 54}{\lambda}\right) \cdot s^{(1,85 - 2,4^{-\lambda \cdot 0,03})} \quad (7)$$

t_k Kühlzeit

s Wanddicke

λ Wärmeleitfähigkeit Werkzeug

S Wärmespeicherzahl Werkzeug

c_p spezifische Wärmekapazität Werkzeugwerkstoff

ρ Dichte Werkzeugwerkstoff

Thermische Bilanzierung des Spritzgießprozesses

Die Abkühlung des Formteils erfordert eine effektive Wärmeabfuhr durch das Werkzeug. Dies resultiert in thermischen Flüssen zwischen der Schmelze, dem Werkzeug und der Umgebung des Werkzeugs. Die Wärmeströme sind in Abbildung 6 dargestellt.

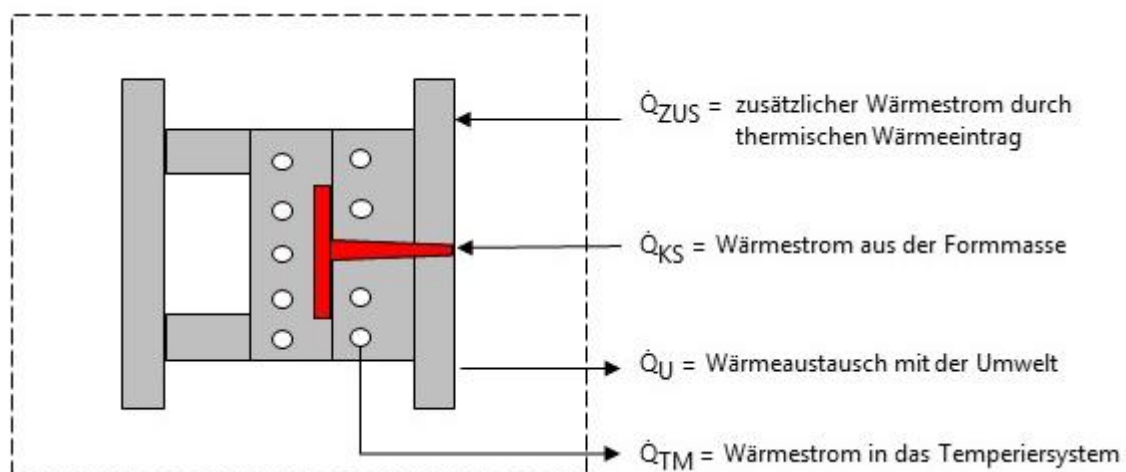


Abbildung 6: Wärmestrombilanz im Spritzgießwerkzeug nach Kretschmar

Im quasistationären Bereich ist eine Summierung der Wärmeströme erforderlich, wobei die dem Bauteil zugeführte Wärmeströme positiv und die entzogenen Wärmeströme

negativ zu zählen sind. Die Zuordnung der dargestellten Wärmeströme ergibt die Wärmestrombilanz, welche in Formel (8) dargestellt ist.

$$\dot{Q}_{KS} + \dot{Q}_{ZUS} = \dot{Q}_U + \dot{Q}_{TM} \quad (8)$$

Die durch die Kunststoffschmelze in das Werkzeug eingebrachte Wärmemenge $\dot{Q}_{KS}$ lässt sich gemäß Formel (9) berechnen. Die spezifische Enthalpie des Kunststoffes bei der Anguss- und Entformungstemperatur wird mit der eingespritzten Masse multipliziert, um die Wärmemenge zu ermitteln. Die Ermittlung des Wärmestroms erfolgt durch Division des Produkts mit der Zykluszeit.

$$\dot{Q}_{KS} = \Delta h \cdot \frac{m_{KS}}{t_z} \quad (9)$$

Δh Differenz der spezifischen Enthalpien

m_{KS} Masse Formteil

t_z Zykluszeit in

Der Wärmeaustausch mit der Umgebung $\dot{Q}_U$ setzt sich aus mehreren Komponenten zusammen: dem Wärmestrom durch Konvektion der Werkzeugseitenflächen $\dot{Q}_{Ko}$, dem Wärmestrom durch Strahlung $\dot{Q}_{St}$ sowie dem leitungsbedingten Wärmestrom zur Aufspannplatte $\dot{Q}_{Lej}$. Die Berechnung des konvektiven Wärmestroms $\dot{Q}_{Ko}$ gemäß Formel (10) erfolgt durch Multiplikation der Seitenflächen des Werkzeugs mit dem Wärmeübergangskoeffizienten mit der Luft und der Temperaturdifferenz zwischen der Werkzeugaußenfläche und der Umgebungstemperatur.

$$\dot{Q}_{Ko} = A_S \cdot \alpha_L \cdot (\vartheta_{WA} - \vartheta_U) \quad (10)$$

A_S Werkzeugseitenflächen

α_L Wärmeübergangskoeffizient

ϑ_{WA} Werkzeugaußentemperatur

ϑ_U Temperatur Umgebung

Der Wärmestrom durch Strahlung $\dot{Q}_{KS}$ wird mit Formel (11) nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz berechnet. Er ergibt sich aus der strahlenden Fläche A_S , dem Emissionsgrad ϵ , der Strahlungskonstante C_S und dem Unterschied der vierten Potenz der normierten Temperaturen der Werkzeugaußenseite und der Umgebung. Die Formel beschreibt den Netto-Wärmeverlust des Werkzeugs durch thermische Abstrahlung.

$$\dot{Q}_{Str} = A_S \cdot \epsilon \cdot C_S \cdot \left[\left(\frac{\vartheta_{WA}}{100} \right)^4 - \left(\frac{\vartheta_U}{100} \right)^4 \right] \quad (11)$$

ϵ Emissionskoeffizient

C_S Strahlungskonstante

Die Wärmeleitung kann in Anlehnung an die Wärmestrahlung durch einen vereinfachten Ansatz mit einem Proportionalitätsfaktor β nach Formel (12) beschrieben werden. Dabei wird der Wärmestrom $\dot{Q}_L$ als Produkt der Aufspannplattenfläche A_A , des Proportionalitätsfaktors β des Wärmeüberganges zwischen Werkzeugaußenwand und Aufspannfläche und der Temperaturdifferenz zwischen warmer und kalter Platte berechnet.

$$\dot{Q}_L = A_A \cdot \beta \cdot (\vartheta_{WA} - \vartheta_U) \quad (12)$$

A_A Fläche Aufspannplatte

β Proportionalitätsfaktor des Wärmeüberganges

ϑ_{WA} Werkzeugaußenwand

ϑ_U Umgebungstemperatur

Wird die Wärmebilanz nach $\dot{Q}_{TM}$ umgestellt und die Heizleistung $\dot{Q}_{ZUS}$ auf null gesetzt, ergibt sich die erforderliche Temperierleistung im System. Auf Basis dieses Wärmestroms erfolgt im Kapitel die Auslegung des Kühlsystems.

2.2 Additive Fertigungsverfahren im Kunststoffwerkzeugbau

Die Entwicklung eines adaptiven Peltier-Elements zur konturnahen Kühlung im Spritzgießwerkzeugbau erfordert die Verfügbarkeit eines adaptiven Fertigungsverfahrens zur Herstellung der Trägerstrukturen. Hierzu bieten sich moderne additive Fertigungsverfahren, insbesondere zur Verarbeitung polymerer und keramischer Werkstoffe an, um geometrisch komplexe und funktionsintegrierte Trägerbauteile effizient realisieren zu können.

2.2.1 Klassifikation additiver Fertigungsverfahren für Kunststoffe

Additive Fertigungsverfahren, auch als 3D-Druck oder generative Fertigung bezeichnet, haben sich in den letzten Jahrzehnten als eine signifikante technologische Entwicklung in der Fertigungstechnik etabliert. Die Vielzahl an Begrifflichkeiten reflektiert die dynamische Entwicklung dieser Verfahren in den vergangenen vier Jahrzehnten. Die exakte Terminologie wird durch die VDI-Richtlinie 3405 und die ISO/ASTM-52900:2015 als "Additive Fertigung" (engl. "additive manufacturing") festgelegt [22, 23]. Der Ausdruck resultiert aus dem schichtweisen Aufbau der Strukturen auf Basis eines dreidimensionalen Modells. Im Gegensatz zu subtraktiven Fertigungstechnologien, wie dem Drehen oder Fräsen, bei denen Material vom Werkstück entfernt wird, zeichnet sich die additive Fertigung durch einen schichtweisen Aufbau von Material aus. Ausgehend von dem zuvor dargelegten Verfahrensprinzip beschreibt Gebhart Additive Fertigungsverfahren

wie folgt: „Als *Additive Fertigungsverfahren* werden alle Fertigungsverfahren bezeichnet, die Bauteile durch Auf- oder Aneinanderfügen von Volumenelementen (Voxeln), vorzugsweise schichtweise, automatisiert herstellen.“ [24] Gemäß der Verfahrensscharakteristik werden Additive Fertigungsverfahren nach DIN 8085 der ersten Hauptgruppe vom Typ Urformen zugeordnet. Innerhalb der Untergruppen erfolgt die Eingliederung entsprechend der Form des Ausgangsmaterials in 1.1 Urformen aus dem flüssigen oder 1.2 Urformen aus dem körnigen oder pulverförmigen Zustand [1].

2.2.2 Additive Fertigungsverfahren für den Kunststoffformenbau

In der Industrie und Forschung sind die folgenden additiven Fertigungsverfahren von entscheidender Relevanz für die Herstellung von Kunststoffformen: Fused Layer Modeling, Stereolithographie und Poly-Jet-Modeling. In der praktischen Anwendung liegt der Fokus auf der Verwendung von Kunststoffwerkzeugen aus Durplasten und warmformbeständigen Thermoplasten. In den nachfolgenden Kapiteln werden die drei potenziellen additiven Fertigungsverfahren präsentiert, die für die Realisierung einer integrierten Kühlung erforderlich sind. Zur besseren Verständlichkeit werden die Verfahren nach der VDI-Richtlinie 3405 bezeichnet.

Fused Layer Modeling (FLM)

Das Fused Layer Modeling-Verfahren (FLM) stellt das am häufigsten angewendete additive Fertigungsverfahren dar. Für die Technologie existieren weitere Bezeichnungen, darunter Fused-Deposition-Modeling (FDM), Fused Filament Fabrication (FFF) und Extrusionsverfahren. Das zugrundeliegende Verfahrensprinzip beruht auf dem Einzug und der Erhitzung von thermoplastischen Kunststoffen in Form von Draht (Filament) oder Granulat. Zu diesem Zweck wird das Material in einen Extruderkopf transferiert und innerhalb der Extrusionsdüse aufgeschmolzen. Im Anschluss wird die thermoplastische Kunststoffschmelze unter einem konstanten Strangdurchmesser und einer konstanten Flussrate schichtweise auf der Druckplatte abgelegt [25].

Die Herstellung einer Verbindung zwischen den einzelnen Schichten erfordert das Aufschmelzen des Materials, das sich unterhalb der zu verbindenden Schicht befindet. Die Bewegung des Druckkopfes zur Fertigung der Geometriekontur erfolgt in der x-y-Ebene. Die Generierung der Höhe des Bauteils wird durch die Bewegung der Bauplattform entlang der z-Achse realisiert. [26]. Die Generierung von Stützstrukturen (engl. Supports) und Grundflächen (engl. Rafts) am Bauteil erfolgt digital, um dessen Überhänge auf der Bauplattform sicher fixieren zu können und den Verzug zu vermindern [25]. Häufig sind Drucker gängiger Hersteller mit einem Mehrfachextruder oder Wechseleinrichtungen ausgestattet, um die Verwendung mehrerer Kunststoffe in einem Druckauftrag zu ermöglichen. In Abbildung 7 wird der beschriebene Verfahrensaufbau

des Fused Layer Modelings dargestellt, wobei sich die Darstellung an Lachmayer orientiert. [27].

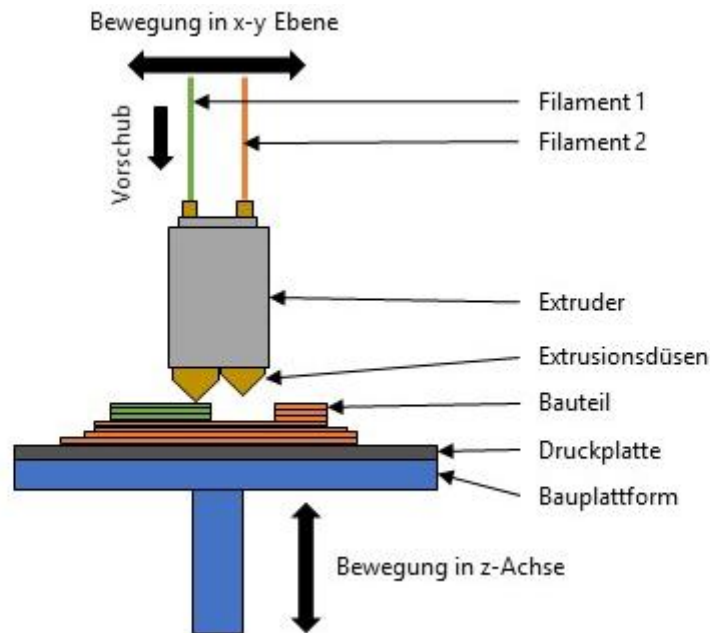


Abbildung 7: Verfahrensaufbau des Fused-Layer-Filament-Verfahrens

Im Anschluss an den Druckprozess ist es gegebenenfalls erforderlich, applizierte Stützstrukturen zu entfernen. Dies kann durch den Einsatz mechanischer Verfahren oder durch den Einsatz von Laugen erfolgen [23]. Zu den am häufigsten verwendeten thermoplastischen Materialien in additiven Fertigungsverfahren zählen Polymerisat Polylactide (PLA), Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS), Polyetherimid (PEI) sowie Polycarbonat (PC) [25]. Die signifikanten Vorteile dieses Verfahrens manifestieren sich in der hohen Materialdiversität, der umfassenden Technologieverbreitung, dem erschwinglichen Anschaffungspreis der Anlage und dem reduzierten Aufwand für die Nachbearbeitung der Bauteile [28]. Die Anwendungsbereiche des FLM-Verfahrens umfassen Konzeptmodelle, Funktionsprototypen, Endprodukte und Tooling über Abformverfahren [24].

Stereolithographie (SLA) und Digital Light Prozess (DLP)

Die Stereolithographie wird gemeinhin als eines der am weitesten entwickelten additiven Fertigungsverfahren betrachtet. Aufgrund der frühen Kommerzialisierung des Verfahrens im Jahr 1987 wird es als Referenzverfahren für alle additiven Verfahrensgruppen herangezogen [24]. Gemäß DIN EN ISO 17296-2 wird die Stereolithographie definiert als "ein additiver Fertigungsprozess, in dem flüssiges Fotopolymer in einer Wanne durch Licht-aktivierte Polymerisation gezielt ausgehärtet wird"[29]. Der Bauprozess wird mittels Schicht-für-Schicht-Bauweise realisiert, wobei eine lokale chemische Vernetzung der Fotopolymerkunstharze stattfindet [23]. Die Fotopolymerisation der Fotopolymere wird durch einen Laser initiiert. Die Positionierung des Lasers wird durch ein

Spiegelpaar realisiert. Der Schichtauftrag erfolgt auf einem Drucktisch, welcher sich in einem mit Fotopolymer gefüllten Behälter befindet. Im Anschluss wird die Bauplattform gesenkt und eine dünne, gleichmäßige Schicht aus neuem, flüssigem Fotopolymerkunstharz aufgetragen. Die Darstellung des Verfahrensaufbaus erfolgt gemäß der von dem Erfinder Charles W. Hull (1984) vorgelegten Konzeption sowie der VDI-Richtlinie 3405 in Abbildung 8.

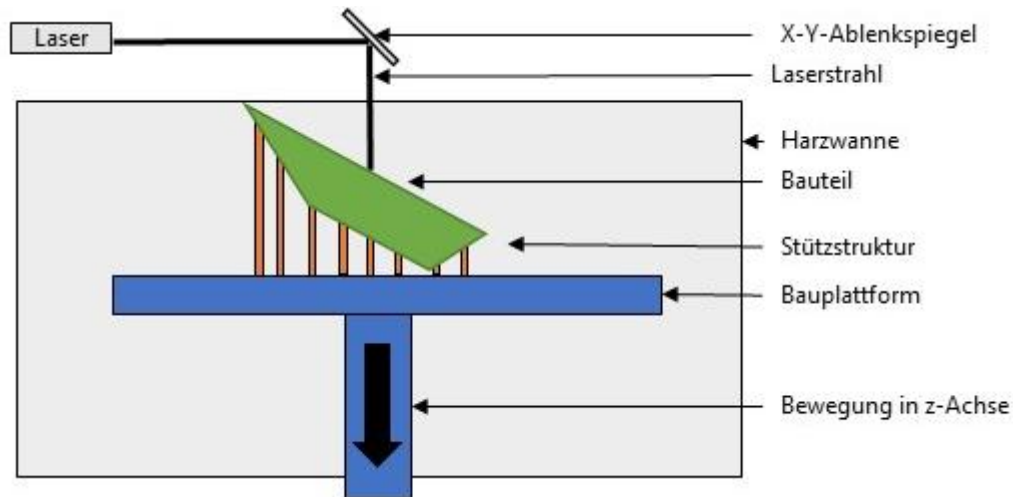


Abbildung 8: Verfahrensaufbau Stereolithographie nach VDI 3405

Im Anschluss an den Generierungsprozess wird in der Regel eine Nachbearbeitung des Bauteils vorgenommen, die mit anderen additiven Verfahren vergleichbar ist. In der Fachliteratur wird dieser Prozess als "Post-Processing" bezeichnet. Im Rahmen der Nachbearbeitung erfolgt die mechanische Entfernung von Stützstrukturen, die Reinigung sowie das Nachvernetzen des Bauteils. Das Vorgehen ist für alle Stereolithographie-Verfahren und -Materialien ähnlich. Die Genauigkeit, die Material- oder Oberflächeneigenschaften können durch einzelne Nachbearbeitungsparameter beeinflusst werden. Es empfiehlt sich, bereits vor der Fertigung der Teile die Nachbearbeitungsschritte zu konzipieren [24].

Für die Anwendung der Stereolithographie steht eine Vielzahl von anwendungsspezifischen Materialien zur Verfügung. Die Entwicklung der Harze erfolgt unter Berücksichtigung spezifischer Anwendungsbereiche, wobei Aspekte wie Maßhaltigkeit, Temperaturfestigkeit, Baugeschwindigkeit, Schlagzähigkeit und Flexibilität von besonderer Relevanz sind [25]. Die Stereolithographietechnik bedient sich zur Herstellung dreidimensionaler Objekte flüssiger strahlungsaushärtender Harze und Fotopolymere. Zu diesem Zweck werden Wellenlängen im ultravioletten (UV) Bereich des elektromagnetischen Spektrums genutzt. Die Belichtung mit UV oder monochromatischem Licht induziert eine chemische Reaktion, die zum Erstarren der Flüssigkeit führt [26]. Die chemischen Reaktionen sind abhängig von der eingesetzten Flüssigkeit. So findet eine freie Radikal-

Fotopolymerisation für Acrylate statt, während für Epoxidharze eine kationische Fotopolymerisation erfolgt [26].

Die Genauigkeit ist abhängig von der Fokussierung des Lasers und weist einen Bereich von $0,13\ \mu\text{m}$ bis $0,76\ \mu\text{m}$ auf [24]. Die Formgenauigkeit ist dabei abhängig von dem angewandten Verfahren sowie dem Ausgangsmaterial. Aufgrund der geringeren Belichtungsleistungen werden in der Regel nach wie vor Acrylate eingesetzt [24]. Die Stereolithographie findet in verschiedenen Einsatzgebieten Anwendung, darunter die Erstellung von Urmodellen, Windkanalmodellen, hochgenauen Komponenten mit feinen Details oder Spritzgießeinsätzen.[25]

Der Einsatz von punkt- oder linienweise belichtenden, beweglichen Laserstrahlen in der additiven Fertigung führt bei größeren Bauvolumen häufig zu langen Herstellungszeiten. Zur Verringerung dieses Problems wurde eine Methode entwickelt, die als flächige Belichtung der Schichtebene in einem flüssigen Medium bezeichnet wird und unter dem Begriff "Digital-Light-Processing" (DLP) bekannt ist. Das Verfahren ist durch einen Digital Micromirror Device (DMD)-Chip charakterisiert, welcher eine Vielzahl steuerbarer Mikrospiegel aufweist. Diese projizieren UV-Licht in einem Raster auf die Bauplattform [25]. Eine alternative Methode stellt die Verwendung von LCD-Displays dar, die ebenfalls mit UV-Lampen ausgestattet sind. Ein wesentlicher Vorteil dieser Technik besteht darin, dass die Bauzeit unabhängig von der tatsächlichen Belegung des Bauraums ist. Dies ermöglicht eine signifikante Zeiteinsparung. Darüber hinaus ermöglicht das Verfahren einen beschleunigten Materialwechsel, da die Bauplattform von oben in ein Polymerbad eingetaucht wird. Dies reduziert den Materialbedarf und vereinfacht den Wechsel [24]. Die Analyse des Anwendungsbereichs sowie der eingesetzten Materialien ergibt eine deutliche Ähnlichkeit zur Stereolithographie. Eine detaillierte Darstellung des Verfahrensaufbaues ist in Abbildung 9 dargestellt.

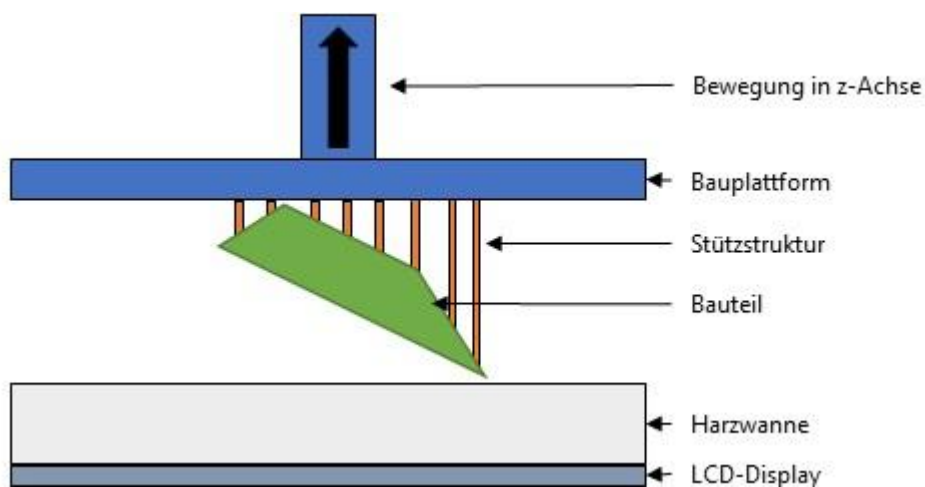


Abbildung 9: Verfahrensaufbau Digital Light Processing nach VDI 3405

Poly-Jet-Modeling (PJM)

Die aufgrund ihrer Präzision am häufigsten verwendeten additiven Herstellungsverfahren für Spritzgießformeinsätze sind das Poly-Jet-Modeling (PJM) und das Multi-Jet-Modeling (MJM) (Abbildung 10). Hierbei handelt es sich um einen schichtweisen Aufbau durch wiederholten linienförmigen Auftrag von flüssigen Photopolymerharzen [23]. Diese Verfahren ermöglichen eine schnelle, skalierbare und kostengünstige Herstellung von Bauteilen. Die Verwendung von standardisierten Druckköpfen, die mit Tausenden von Druckdüsen ausgestattet sind, erlauben die Verarbeitung einer Vielzahl unterschiedlicher Materialien simultan [26]. Die Schichterzeugung der Materialien wird durch thermische oder fotochemische Prozesse erzeugt. Im Rahmen des thermischen MJM-Prozesses erfolgt die Applikation des aufgeschmolzenen Wachses (Stützmaterial) oder des thermoplastischen Kunststoffes durch Tröpfchen aus dem Druckkopf auf die Bauplatte. Während des Falls kommt es zum Abkühlen des Tropfens, woraufhin eine Verbindung mit dem Zielkörper beim Auftreffen entsteht. Im Rahmen des fotochemischen Prozesses erfolgt der Auftrag im flüssigen Zustand. Das Aushärten des Fotoharzes erfolgt durch die Belichtung mit einer UV-Lampe. Die UV-Strahlung induziert einen Verfestigungsmechanismus, welcher eine Vernetzungsreaktion auf Basis von gespaltenen Radikalen initiiert. In beiden Prozessen erfolgt eine Nivellierung der entstandenen Schichten mittels mechanischer Bearbeitung, wobei der Einsatz von Fräsern oder Messern zu berücksichtigen ist [25]. Ein exemplarischer Aufbau des hier beschriebenen Verfahrens erfolgt in Abbildung 10 unter Heranziehung der Publikation von Lachmayer [28]

Die im Zuge des Bauprozesses erzeugten Stützstrukturen werden in Abhängigkeit des verwendeten Stützmaterials im Anschluss ausgewaschen. Die Entfernung der Stützstrukturen erfolgt mittels speziell temperierter Reinigungsanlagen, Wassersstrahlkabinen oder Ultraschallreinigungsanlagen [24]. Die Jetting-Verfahren ermöglichen die Verarbeitung von Thermoplasten, Wachsen und Harzen. Die Materialvielfalt erlaubt die gezielte Mischung von Farben sowie die Einstellung mechanischer Eigenschaften [25]. Die PJM- und MJM-Verfahren zeichnen sich durch minimale Schichtdicken von 0,00635 mm zu erreichen. In der x-y-Ebene wird eine Auflösung von bis zu 5000 x 5000 Dots per Inch (DPI) erreicht [26]. Es existieren diverse Anwendungsbereiche, die über die Herstellung von Kunststoffformteilen hinausgehen. Hierzu gehören die Herstellung sehr genauer Prototypen, medizinischer Produkte sowie von Schmuck.

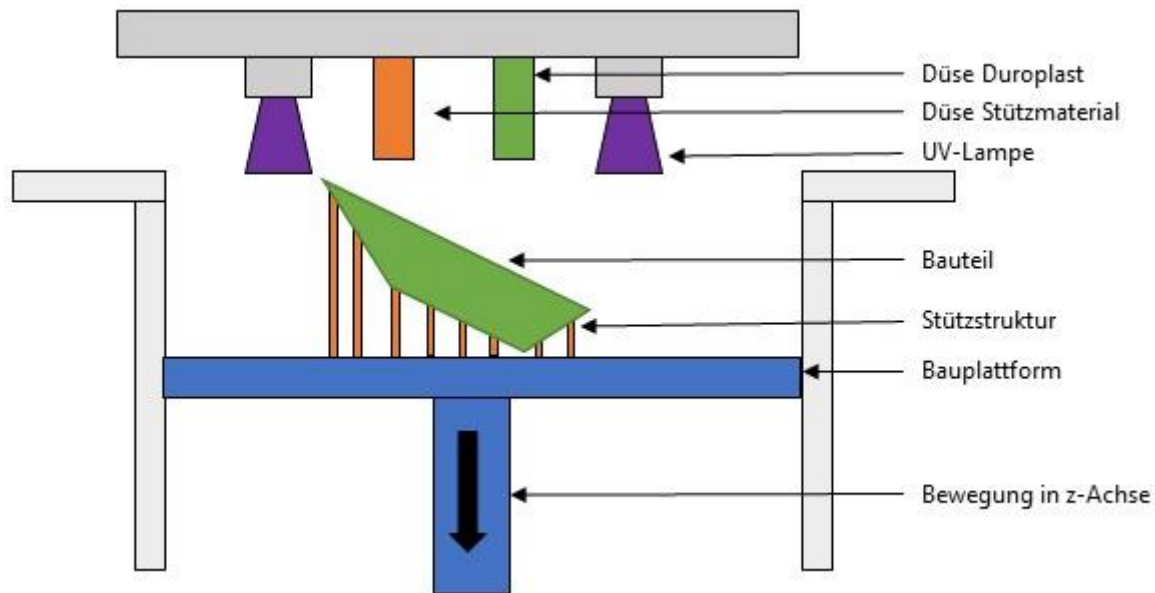


Abbildung 10: Verfahrensablauf Poly-Jet-Modeling nach VDI 3405

2.3 Funktionsweise und Auslegung von Peltier-Elementen

Der Peltier-Effekt ist, neben den Effekten von Seebeck, Thomson und Benedikt einer der vier fundamentalen Effekte der Thermoelektrik. Im Jahr 1834 wurde durch J. Ch. A. Peltier die Entdeckung gemacht, dass ein Stromdurchfluss in einem metallischen Leiter zu einer Temperaturdifferenz führt. In diesem Kontext wurden von Peltier Metallpaarungen untersucht, die unter Strom zu einem isothermalen Kreis zusammengefügt sind. Er stellte fest, dass sich an den Kontaktflächen der Metalle eine Temperaturdifferenz einstellt. Die Resultate von Peltier konnten in der Folge nicht repliziert werden und erfuhren daher keine Anerkennung [30]. Im Jahr 1838 bestätigte Lenz die Beobachtungen der Experimente von Peltier [31]. In der modernen Technik findet der Peltier-Effekt in Form von elektronischen Bauteilen Anwendung bei der stabilen und präzisen Temperaturregelung von empfindlichen Baugruppen oder Flüssigkeiten. Als Anwendungsbeispiele können die Kühlung von Schaltschränken, Hochleistungslasern oder die Kondensation von Wasserdampf angeführt werden [32].

2.3.1 Der Peltier-Effekt und seine physikalischen Grundlagen

Gemäß Irrgang wird der Peltier-Effekt wie folgt beschrieben: „Der Peltier-Effekt beschreibt beim Vorliegen zweier verschiedener, jedoch miteinander verbundener elektrischer Leiter eine Abkühlung oder Erwärmung in ihren Verbindungs- bzw. Kontaktstellen, wenn die Leiter stromdurchflossen sind.“ [31]. Die experimentelle Konfiguration eines Peltier-Elementes wird in Abbildung 11 veranschaulicht. Das Element besteht im einfachsten Fall aus zwei unterschiedlichen Metallen oder einem p-dotierten und n-dotierten Halbleiterelement. Diese Elemente werden auch als Säulen bezeichnet. Die Verbindung der Säulen erfolgt mittels eines Verbindungselements aus Metall. An der

gegenüberliegenden Seite erfolgt die Verbindung der Elemente mit einer Gleichstromquelle mittels Kabel.

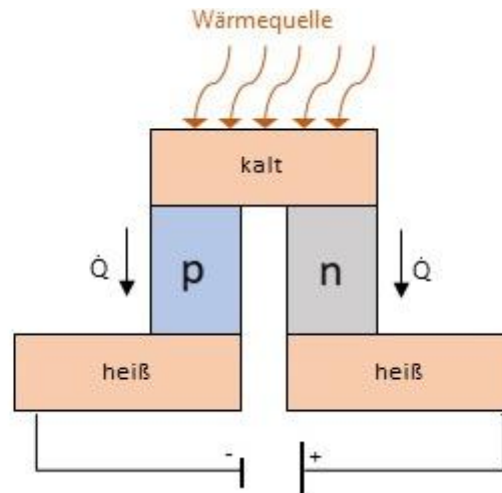


Abbildung 11: Aufbau eines Peltier-Elementes

Im n-Typ ist die Anzahl der Elektronen größer als die der Protonen, während es im p-Typ umgekehrt ist. Infolgedessen kommt es zu einer Übergewichtigkeit der Protonen im p-Typ und eines Überangebots an Elektronen im n-Typ, was zur Bildung von Löchern führt. Die Halbleiterelemente sind elektrisch in einer Reihe und thermisch in einer Parallelschaltung geschaltet. Wird eine elektrische Ladung aus einer Gleichstromquelle angelegt, so findet eine Migration der Elektronen und Löcher von der kalten zur heißen Seite statt. Es sei darauf hingewiesen, dass sich Elektronen gemäß der physikalischen Stromrichtung von Minus nach Plus bewegen [33]. Der Effekt gründet auf den Leitungsbändern von Metallen und Halbleitern, welche durch freie Elektronen im Metallgitter ermöglicht werden. Im Falle des Kontakts zwischen den Metallen kommt es zu einem Ausgleich des Potentials zwischen den Materialien. Durch das Anlegen eines elektrischen Stroms werden die Potentiale erhöht und es wird Wärmeenergie aufgenommen. An der gegenüberliegenden Kontaktstelle ist ein Absinken des Energiepotentials beobachten, welches mit einer Abgabe von Energie einhergeht [34]. Die thermoelektrischen Eigenschaften eines Materials sind abhängig von den Energiebändern des Materials, der Trägerbeweglichkeit, Diffusivität, Trägerlebensdauer und Oberflächeneffekten [33]. Die exakte Berechnung der thermoelektrischen Eigenschaften der Elemente erfordert die Anwendung von Boltzmann-Transportgleichungen oder nonequilibrium Green's functions. Diese werden herangezogen, um den Ladungstransport und den Wärmetransport zu beschreiben [30].

In der praktischen Anwendung finden einzelne Peltier-Elemente nur selten Verwendung, da sie aufgrund ihrer Kühlleistung und Geometrie mit einer geringen Spannung, aber hohem Strom betrieben werden müssten. Daher werden Thermoelemente mittels Brücken aus Materialien mit hoher elektrischer Leitfähigkeit, wie beispielsweise Kupfer,

zu einem Thermomodul verbunden. Die Verbindungsglieder werden durch elektrisch isolierende und thermisch leitende Platten aus Aluminiumoxid oder Berylliumoxid gehalten. Der Einsatz von unterschiedlichen Materialien kann einen Einfluss auf den Wärmeübertragungsprozess von der Wärmequelle an die Wärmesenke haben [35].

Die Abbildung 12 illustriert die Materialien, die über einen Zeitraum von fünf Jahrzehnten für die Säulen des Peltier-Elements Verwendung fanden. Die Figur of Merit (FOM) stellt einen zentralen Materialkennwert für thermoelektrische Materialien dar und gibt Aufschluss über deren Leistungsfähigkeit. Die Berechnung der Figur of Merit wird in Formel (14) erläutert.

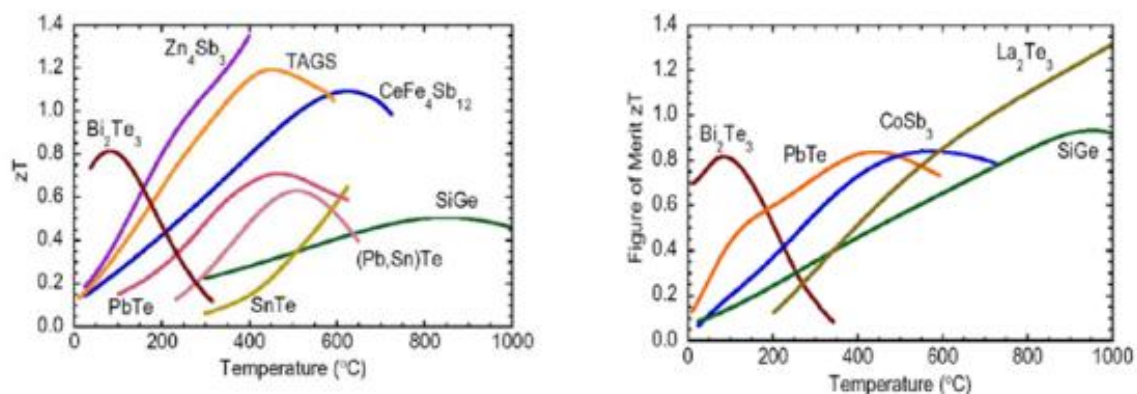


Abbildung 12: Thermoelektrische Kennwerte diverser Materialien [36]

In den vergangenen Jahren wurde im Bereich der Materialforschung für thermoelektrische Materialien ein Fokus auf anorganische Verbindungen wie Oxyselenide, Wismut-tellurid-Legierungen, Zinn-Selen-Verbindungen und thermoelektrische Composites unter Verwendung von Kohlenstoffnanotubes gelegt [30].

2.3.2 Thermodynamische Auslegung von Peltier-Modulen für Spritzgießwerkzeuge

Die Dimensionierung eines Peltier-Elements bedingt eine detaillierte thermophysikalische Beschreibung der eingesetzten Halbleitermaterialien. In diesem Kontext ist der materialspezifische Seebeck-Koeffizient von entscheidender Relevanz, da er die elektrische Spannung angibt, die bei einer gegebenen Temperaturdifferenz zwischen den Kontakten eines Materials entsteht. Gemäß dem physikalischen Grundprinzip, das als Seebeck-Effekt bezeichnet wird, kann die elektrische Spannung zwischen zwei Seitenflächen eines Halbleiters gemessen werden. Die Messung in Forme des Seebeck-Koeffizienten erfolgt hierbei aus dem Quotienten einer Temperaturdifferenz zwischen den beiden Seiten und einer resultierenden Spannungsdifferenz. Der experimentelle Zusammenhang wird durch die Formel (13) dargestellt und bildet die Grundlage für die

Auslegung von Peltier-Elementen. In vorliegendem Kapitel werden angeführte Formeln und Berechnungsweisen präsentiert, die sich an Macia [36] orientieren.

$$S = \frac{\Delta U}{\Delta \vartheta} \quad (13)$$

In der Thermoelektrik ist es üblich, die Materialeigenschaften über die sogenannte Material Figure of Merit zu beschreiben. Die in Formel (14) dargestellte FOM charakterisiert die thermoelektrischen Eigenschaften eines Materials unter der Annahme konstanter Materialart, Transporteigenschaften und Säulengeometrie. Die Größe der elektrischen Leitfähigkeit sowie der Wärmeleitfähigkeit des Materials sind dabei maßgeblich.

$$Z = \frac{\sigma \cdot S}{\kappa} \quad (14)$$

Die Kennzahl ist in hohem Maße temperaturabhängig, da sie sich nach der Temperatur des Materials und der Bewegung der Ladungsträger im Inneren richtet. Aus diesem Grund erfolgt die Angabe in der Regel in Abhängigkeit von der Temperatur. Aus diesem Grunde erfolgt eine Erweiterung der Berechnung aus Formel (14) um die Temperatur, die gemäß Formel (15) zu berücksichtigen ist. Das vorrangige Ziel gegenwärtiger Forschungsbestrebungen besteht darin, ein Material mit einem ZT-Wert von über 3 zu entwickeln, da ein solcher Wert die Realisierung eines effektiven Kühlprozesses ermöglichen würde.

$$ZT = \frac{\sigma \cdot S}{\kappa} \cdot T \quad (15)$$

Für die Auslegung eines Peltier-Elements, das aus zwei unterschiedlichen Materialien besteht, kann die sogenannte „Thermocouple Figure of Merit“ als Kennzahl herangezogen werden. Gemäß der Formel (17) ergibt sich diese Größe aus den Seebeck-Koeffizienten S der beiden Materialien, den thermischen Transporteigenschaften K sowie dem internen elektrischen Widerstand r des Elements.

$$Z = \frac{(S_p - S_n)}{K \cdot r} \quad (16)$$

Der Wert K ergibt sich gemäß Formel (17) aus der Summe der thermischen Leitwerte der einzelnen Säulen, wobei sich der thermische Leitwert als Quotient der Wärmeleitfähigkeit multipliziert mit der Querschnittsfläche und durch die Länge der jeweiligen Säule berechnet. Auf Grundlage des Z-Werts kann die Leistungsfähigkeit eines thermoelektrischen Elements im Vergleich zu anderen bewertet werden.

$$K = \frac{\kappa_p A_p}{l_p} + \frac{\kappa_n A_n}{l_n} \quad (17)$$

Maßgeblich für die Auslegung des Kühlsystems ist neben dem verwendeten Material insbesondere die benötigte Anzahl an Peltier-Elementen, um die erforderliche Wärmemenge zwischen Werkzeug und Kavität zu transportieren. Die Durchführung der erforderlichen Berechnungen setzt die Kenntnis des Gesamtwärmefflusses des thermoelektrischen Elements voraus. Dieser kann gemäß Formel (18) ermittelt werden, indem aus abgeführten Kälteflusses $\dot{Q}_c$ und der zugeführten elektrischen Leistung P_e miteinander multipliziert werden.

$$\dot{Q}_h = \dot{Q}_c \cdot P_e \quad (18)$$

Formel (19) veranschaulicht den Wärmeffluss von der kalten zur heißen Seite des Peltier-Elements. Der erste Summand steht für die durch den Peltier-Effekt erzeugte thermische Leistung, der zweite für den Wärmeffluss infolge Wärmeleitung basierend auf dem Wärmedurchgangskoeffizienten und der dritte Term berücksichtigt den Verlust durch Joule-sche Erwärmung.

$$\dot{Q}_h = I \cdot T_h \cdot (S_p - S_n) + K \cdot \Delta T + 0,5 \cdot I^2 \cdot r \quad (19)$$

Die Kühlleistung des Elements kann mit der Formel (20) berechnet werden. Die vorliegende Beschreibung thematisiert den Wärmestrom, welcher von der kalten Seite eines thermoelektrischen Moduls abgeführt wird. Der erste Term steht für die Peltier-Kühlung, die sich aus dem elektrischen Strom und der Temperatur an der Kontaktstelle ergibt. Der zweite Term berücksichtigt den Wärmeverlust durch Wärmeleitung (Diffusion) von der heißen zur kalten Seite. Der dritte Term beschreibt die durch ohmsche Verluste entstehende Wärme, welche die Netto-Kühlleistung reduziert.

$$\dot{Q}_c = I \cdot T_h \cdot (S_p - S_n) - K \cdot \Delta T - 0,5 \cdot I^2 \cdot r \quad (20)$$

Die elektrische Leistung, welche von der Batterie oder der Stromquelle verbraucht wird, die das Thermoelement speist, umfasst die Arbeit, die gegen die Seebeck-Spannung geleistet wird, sowie die Joulesche Erwärmung aufgrund des Widerstands der Thermoelementssäulen. Die Berechnung dieser Leistung erfolgt gemäß Formel (21).

$$P_e = I \cdot (S_p - S_n) \cdot \Delta T + r \cdot I^2 \quad (21)$$

Die optimale Stromstärke, bei der die maximale Kühlleistung erreicht wird, kann gemäß Formel (22) berechnet werden. Diese ergibt sich aus der Differenz der Seebeck-Koeffizienten der beiden Materialien, multipliziert mit dem Temperaturgradienten und geteilt durch den Widerstand des Peltier-Elements.

$$I_c = \frac{(S_p - S_n) \cdot \Delta T}{r} \quad (22)$$

Aufgrund der Tatsache, dass ein Thermomodul aus einer Mehrzahl von Thermoelementen besteht, kann die Formel (20) um den Faktor n für die Anzahl der Elemente

ergänzt werden. In der Folge wird jeder einzelne Summand der Formel mit der Anzahl der Thermoelemente multipliziert.

2.3.3 Wirkungsgrad und „Coefficient of Performance“

Die Bewertung von Peltier-Modulen erfolgt anhand spezifischer Kennwerte. Der Wirkungsgrad η eines Peltier-Elements, der die Heizleistung beschreibt, ergibt sich aus dem Verhältnis der zugeführten elektrischen Leistung zur resultierenden Wärmeleistung, wie in Formel (23) dargestellt. Dieser Kennwert ermöglicht einen Vergleich mit dem theoretischen Carnot-Wirkungsgrad und kann ebenso zur Bestimmung der Kühlleistung verwendet werden.

$$\eta = \frac{P_e}{\dot{Q}_h} \quad (23)$$

Der „Coefficient of Performance“ (COP) wird als Verhältnis der bereitgestellten Wärme- oder Kälteleistung zur eingesetzten elektrischen Energie definiert. Er berechnet sich gemäß Formel (24). Ein höherer COP deutet darauf hin, dass pro Einheit elektrischer Energie mehr thermische Energie als Nutzleistung bereitgestellt wird.

$$\text{COP} = \frac{\dot{Q}_h}{P_e} \quad (24)$$

3 Stand der Technik additiv gefertigter Formwerkzeuge

3.1 Aktuelle Entwicklungen bei additiv hergestellten Formeinsätzen aus Kunststoff

Wie in Kapitel 2.2.2 dargestellt, finden additive gefertigte Formwerkzeuge bereits seit geraumer Zeit Anwendung. Die Fertigungsverfahren, die im Rahmen des Rapid Tooling Anwendung finden, umfassen unter anderem die Blechumformung, das Blasformen und insbesondere das Spritzgießen [37]. Im folgenden Abschnitt werden aktuelle Entwicklungen im Bereich des Spritzgießens mit additiv gefertigten Formeinsätzen vorgestellt. Formeinsätze sind Gießformen, die in ein Trägerwerkzeug eingesetzt werden können und einen schnellen Wechsel der Formgeometrie zur Herstellung unterschiedlicher Bauteile ermöglichen. Im Gegensatz zu herkömmlichen Formeinsätzen, deren Herstellung durch subtraktive Verfahren wie Fräsen oder Erodieren erfolgt, werden die additiv gefertigten durch die in Kapitel 2.2 beschriebenen Verfahren hergestellt.

3.1.1 Anwendungsgebiete und -potenziale für den Einsatz additiv gefertigter Formwerkzeuge

In der vorliegenden Zusammenfassung präsentiert Pelin eine umfassende Übersicht über die Anwendung additiver Formwerkzeuge. Diese ermöglichen die Umsetzung individueller Designs, verkürzen die Produktionszeiten und senken die Herstellungskosten. Ein verstärkter Einsatz dieser Technologie wird insbesondere in den Branchen Automobilbau, Luftfahrt und Medizintechnik prognostiziert. Die additiv hergestellten Formen finden sowohl in der Prototypenfertigung als auch in der Serienproduktion Anwendung. Darüber hinaus begünstigt die hohe Verfügbarkeit spezialisierter Dienstleister die Herstellung dieser Formen zu vergleichsweise geringen Kosten [38].

Ein praktisches Beispiel für die Anwendung additiv gefertigter Formeinsätze aus Kunststoff ist die Individualisierung von Produkten, etwa durch das Einbringen von Schriften oder Logos. In einer empirischen Untersuchung wurden individualisierte Werkzeuge anhand zweier Beispiele evaluiert: einer Schachfigur und eines Clips. Die Konstruktion der Formeinsätze wurde von zwei getrennten Teams vorgenommen. Mittels der hergestellten Werkzeuge gelang die erfolgreiche Produktion von Bauteilen im Spritzgießverfahren. Es wurde jedoch ersichtlich, dass für den Einsatz in der Serienproduktion eine weitere Optimierung erforderlich ist, insbesondere in Bezug auf die vereinfachte Entformbarkeit und die Standzeit des Werkzeugs [39].

3.1.2 Harz- und Filament-basierte additive Fertigungsverfahren für Kleinserienwerkzeugen

In einem White Paper der Firma Formlabs wird die additive Herstellung von Spritzgießformen aus firmeneigenen Kunstharzsystemen mittels des DLP-Verfahrens beschrieben. Dabei werden Richtlinien für die drei Entwicklungsphasen – Konstruktion, Fertigung und Prozessparameter des Spritzgießprozesses – vorgestellt. Praxisbeispiele zeigen, dass sich durch dieses Verfahren sowohl die Herstellungszeit der Werkzeuge verkürzen als auch die Material- und Produktionskosten für Kleinserienwerkzeuge signifikant senken lassen [40].

In der Publikation von Dempsey et al. wird die Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit stabiler und kostengünstiger Formeinsätze für das Mikrospritzgießen untersucht. Im Rahmen des Projekts wurde das DLP-Druckverfahren angewendet, wobei eine Linienstruktur mit variierenden Höhen von 25 µm innerhalb einer Breite von 100 µm über 78 Spritzzyklen hinweg reproduzierbar hergestellt wurde. Die Untersuchung ergab, dass ein höheres Aspektverhältnis (größeres Verhältnis zwischen Strukturhöhe und -länge) zu einer gesteigerten thermischen Belastung des Werkzeugs führt, was wiederum den Verschleiß beschleunigt. Aufgrund der geringeren Wärmeleitfähigkeit und höheren spezifischen Wärmekapazität von Kunststoffen im Vergleich zu Metallen wurde die Notwendigkeit betont, die thermischen Belastungen innerhalb des Werkzeugs detaillierter zu analysieren [41].

Mitterlehner legte den Fokus auf die Erlangung eines tieferen Verständnisses der Vorgänge in additiven Formeinsätzen. Zu diesem Zweck wurden verschiedene Einsätze, die mit unterschiedlichen additiven Fertigungsverfahren hergestellt wurden, im Spritzgießprozess untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass additive gefertigte Formeinsätze im Vergleich zu Einsätzen aus Aluminium oder Stahl eine geringere Temperaturleitfähigkeit und längere Kühlzeiten aufweisen. Durch den gezielten Einsatz von Temperierkanälen konnte jedoch eine signifikante Reduktion der Kühlzeiten erzielt werden. Weiterhin zeigte die Untersuchung, dass Formeinsätze aus Polymer eine hohe Sensibilität gegenüber Temperatur und Druck aufweisen, wobei etwa elf Spritzgießzyklen ohne sichtbare Schäden durchgeführt werden konnten. Der Forschungsbedarf liegt vor allem in der Optimierung der Temperierkanalgestaltung sowie der Entwicklung neuer Werkstoffe mit verbesserten thermischen und mechanischen Eigenschaften.[42].

Ähnliche Ergebnisse erzielten Beitz-Lozano et al., die die Herstellung von Formeinsätzen für komplexe Bauteile mittels DLP-Verfahren untersuchten. Die Ergebnisse wiesen auf eine erhöhte Festigkeit der Bauteile hin, was auf die langsamere Abkühlung während des Spritzgießprozesses zurückzuführen ist. [43].

Laut König et al. eignet sich das Material Ultracur3D RG 3280 von der Firma BASF für die Herstellung additiver Formeinsätze im DLP-Verfahren. Die Ergebnisse zeigen, dass abhängig von der verwendeten Formmasse 10- 20 Teile in einem Formeinsatz gefertigt werden konnten [44].

Aktuelle Untersuchungen befassen sich auch zunehmend mit thermoplastischen Formwerkzeugen. Prigann analysierte den Einsatz dreier thermoplastischer Werkstoffe hinsichtlich ihrer Eignung für die Herstellung additiver Formeinsätze. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass durch das FLM-Verfahren die Herstellung von Werkzeugen mit einer Standzeit von mehr als 50 Spritzgießzyklen möglich ist. Ein Forschungsbedarf besteht jedoch in der Optimierung der Spritzparameter [45].

Lusic et al. wiesen in ihrer Untersuchung auf Potenziale zur Reduzierung des Materialverbrauchs bei der Herstellung von additiven Laminierwerkzeugen durch den Einsatz von Füllstrukturen hin. Die Ergebnisse zeigten, dass unter Druckbelastung durch Schalen-, Kreuz- und Wabenstrukturen signifikante Material- und Zeitersparnisse erzielt werden können, ohne die notwendige Steifigkeit des Bauteils zu beeinträchtigen. Diese Erkenntnisse könnten auf Spritzgießwerkzeuge angewendet werden, um den Materialverbrauch und die Fertigungszeit zu reduzieren. [46].

Zusätzlich wurde in einer weiteren Studie die Herstellung von Spritzgießformen mit Schiebern zur Fertigung komplexer Geometrien untersucht. In der ersten Versuchsreihe, die eine einfache Geometrie umfasste, konnten 122 Teile produziert werden, wobei es zu Schwankungen in der Prozessfähigkeit kam. In der zweiten Versuchsreihe führte abrasiver Verschleiß zu Rissbildungen am Bauteil. Diese Studie bestätigt grundsätzlich die Anwendbarkeit von polymerbasierten, additiv gefertigten Schieberwerkzeugen, identifiziert jedoch Optimierungspotenziale hinsichtlich der Schieberpositionierung, des Schwindungsverhaltens und der Werkzeugkonstruktion [47].

3.1.3 Herausforderung bei der Temperierung additiver Kunststoffformwerkzeuge

Kuo et al. führten Untersuchungen zur Reduzierung der thermischen Belastungen in additiven Kunststoffformeinsätzen durch. Dabei lag auf der Analyse konturnaher Kühlkanäle mit dem Ziel, die Kühlleistung einer Silikonform für das Spritzgießen zu optimieren. Zu diesem Zweck wurden verschiedene Kühlkanal-Layouts sowohl simuliert als auch praktisch getestet. Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen, dass die Wärmeaustauschfläche einen signifikanten Einfluss auf die Kühlzeit hat. Das effizienteste Layout führte zu einer Verkürzung der Kühlzeit. Diese Erkenntnisse liefern wertvolle Hinweise für die Gestaltung konturnaher Kühlkanäle in additiv gefertigten Formträgern. In

weiteren Untersuchungen soll die Gestaltung der Kühlkanäle dann auf Formwerkzeuge aus anderen Kunststoffen übertragen werden [48].

In einer weiteren Untersuchung wurde die Methode des "Rapid Heat Cycle Molding" (RHCM) analysiert, bei der Formwerkzeuge zyklisch schnell erhitzt und abgekühlt werden. Diese Vorgehensweise optimiert die Fließeigenschaften der Polymer-Schmelze, was die Herstellung komplexerer Bauteile ermöglicht. Allerdings lässt sich diese Temperierungsmethode in aktuellen additiven Formwerkzeugen noch nicht integrieren, da die thermische Beständigkeit gegen wechselnde Temperaturen des verwendeten Harzes bislang unzureichend sind [49].

Die Zielsetzung einer weiteren Untersuchung bestand darin, eine präzise Prognose des mechanischen und thermischen Verhaltens im Inneren des kunststoffbasierten Wechselformeinsatzes zu generieren. Krizma et al. entwickelten eine gekoppelte Simulation, die auf einer Finite-Element-Analyse sowie einer Moldflow-Analyse basiert. Durch die Überwachung spezifischer Werkzeugparameter wie Druck, Dehnung und Temperatur konnten kritische Belastungen innerhalb der Form quantifiziert und experimentell validiert werden. Diese signifikante Korrelation ermöglicht es, kritische Bereiche des Kunststoffwerkzeugs zu prognostizieren. Es sei darauf hingewiesen, dass im Rahmen der Simulation Kühl- und Auswerfersysteme nicht berücksichtigt wurden [50]

3.1.4 Gestaltungsrichtlinien für additive Kunststoffformwerkzeuge

Gerrent präsentierte in einer Zusammenfassung den Workflow der thermischen Auslegung von additiven Formeinsätzen. Ziel dieses Modells ist es, die Temperaturführung im Spritzgießprozess gezielt zu steuern, um sowohl die Qualität der Bauteile als auch die Zykluszeiten zu optimieren. Das Modell berücksichtigt die eingeschränkte Wärmeleitfähigkeit polymerer Werkstoffe und integriert konturnahe Kühlung sowie thermische Simulationen. Gerrent fasst die wesentlichen Erkenntnisse zusammen und bietet eine systematische Methode zur werkzeuggerechten Gestaltung an, die die Einsatzfähigkeit von Kunststoffformen im Prototypenbau verbessert [51].

In einer weiteren Arbeit präsentierten Junk et al. einen allgemeineren Ansatz zur Gestaltung von Formeinsätzen, der anhand eines exemplarischen Beispiels veranschaulicht wird. Es wird eine Zusammenfassung der gängigen Parameter vorgenommen, die aus verschiedenen Quellen entnommen wurden und die Geometrie, das Werkzeugmaterial, das Einspritzsystem, das Temperiersystem sowie das Auswerfersystem betreffen [52]. Dieser allgemeine Ansatz ergänzt die spezifische thermische Auslegung von Gerrent und erweitert somit die Gestaltungsrichtlinien für additive Formeinsätze.

3.1.5 Zusammenfassende Betrachtung additiver Formeinsätze im Kunststoffwerkzeugbau

Gemäß dem aktuellen Stand der Forschung werden additive Formeinsätze aus Kunststoff in der Praxis vor allem für die Entwicklung von Prototypen-Spritzgießwerkzeugen, die Kleinserienfertigung oder die Herstellung individueller Formen eingesetzt. Die Forschung fokussiert sich dabei nicht auf eine ganzheitliche Betrachtung, sondern auf einen der drei wesentlichen Konzeptionierungsschwerpunkte. Ein zentraler Aspekt ist hierbei die Temperierung des Werkzeugs, da Kunststoffe deutlich schlechtere thermische Eigenschaften als Metalle aufweisen und somit längere Abkühlzeiten erfordern.

Ein weiterer Fokus liegt auf der thermischen Alterung der Kunststoffformeinsätze und der dadurch bedingten Begrenzung der Schusszahl der Werkzeuge. Es besteht ein Bedarf an Temperiersystemen, die eine konstante Werkzeugtemperatur sicherstellen, ohne dabei die Steifigkeit der Form zu beeinträchtigen. In der wissenschaftlichen Literatur werden sowohl Harz- als auch Filament-basierte additive Fertigungsverfahren untersucht. Das FLM-Verfahren ist aufgrund seiner weiten Verbreitung und kostengünstigen Materialien für den Einsatz in der Prototypenfertigung prädestiniert.

Aufgrund der besseren thermischen Beständigkeit von Harzsystemen und der höheren Auflösung der gedruckten Formen im DLP- und PJP-Verfahren finden diese Verfahren jedoch zunehmend Anwendung in der Fertigung von Kleinserienwerkzeugen. Die Wahl des Verfahrens hängt daher von den spezifischen Anforderungen an das Werkzeug, wie z.B. thermische Beständigkeit und Auflösung ab.

3.2 Thermoelektrische Werkzeugtemperierung mittels Peltier-Technologie

Zur Optimierung der Oberflächenqualität und Maßhaltigkeit von Bauteilen finden in der industriellen Praxis variotherme Kühlsysteme Anwendung, die auf thermoelektrischen Modulen (TEC) basieren. Dabei liegt der Fokus auf den Bereichen Medizintechnik und Mikroelektronik. Zu den weiteren Vorteilen zählen Energieeinsparungen durch eine gezielte Kühlung sowie der medienlose Abtransport der beim Spritzgießen eingebrachten Wärmeenergie [53].

Eine der frühesten Anwendungen von Peltier-Elementen in Spritzgießwerkzeugen wurde 1970 durch Stromblad et al. im Patent DE 2046526A beschrieben. Dort wurde ein thermoelektrisches Modul in die Formkavität integriert, um durch Umpolung des Moduls sowohl Wärme als auch Kälte gezielt einzuleiten [54].

Eine Weiterentwicklung stellt ein Mikrospritzgießwerkzeug dar, das sich aus drei funktionalen Schichten zusammensetzt: Die erste Ebene beinhaltet eine Widerstandsheizschicht zur Erwärmung der Kavität beim Einspritzen. Die zweite Ebene integriert ein Peltier-Element zur schnellen Temperaturregelung, das sowohl heizen als auch durch Umpolung kühlen kann. Eine dazwischenliegende Isolierschicht fungiert als elektrische und thermische Barriere zwischen dem Peltier-Modul und der Kavität. Die dritte Schicht besteht aus einem wassergekühlten Kanal zur Ableitung überschüssiger Wärme. Dieses Konzept ermöglicht eine präzise und energieeffiziente Temperaturführung im Werkzeug [55].

Als weiteren innovativen Ansatz zur konturnahen Temperierung kann die von Nardin et al. verfolgte Kombination konturnah positionierter Peltier-Elemente mit einem sekundären Wasserkühlsystem sowie einer sensorgestützten Steuerung angeführt werden. Die Temperierung einzelner Kavitätsbereiche wird durch diese Kombination unabhängig voneinander ermöglicht. Die experimentellen Ergebnisse demonstrieren die Möglichkeit der Realisierung von Temperaturwechseln in einem Bereich von +5 °C bis 80 °C innerhalb eines Zeitraums von 1,8 s. Diese Entwicklung ermöglicht die Herstellung komplexer, filigraner Strukturen und die gezielte Beeinflussung der Fließeigenschaften der Kunststoffschmelze [56].

Aktuelle Forschungskonzepte demonstrieren die Integration thermoelektrischer Elemente mit passiven Wärmeleitern aus diversen Materialien. Lee et al. entwickelten ein neuartiges Kühlsystem, das sich durch eine hohe Kühlleistung bei gleichzeitiger Homogenität der Abkühlung auszeichnet. Die Reduktion interner Spannungen resultierte in einem geringeren Verzug bei Spritzgießbauteilen, was einen signifikanten Vorteil für die Maßhaltigkeit komplexer Produkte darstellt [57].

Im Bereich des Mikrospritzgießens zur Herstellung von mikroelektromechanischen Systemen (MEMS) ergibt sich ein weiterer Anwendungsbereich. In diesem Modell wird ein Peltier-basiertes Kühlsystem integriert, mit dem Ziel, die Wirtschaftlichkeit durch reduzierte Ausschussraten zu verbessern. Die konturnahe Kühlung in einer Entfernung von lediglich 200 µm zum 30 × 30 mm großen Peltier-Element resultiert bei einer Leistungsaufnahme von 34,5 W in einem Temperaturunterschied von 65 K zwischen Kavität und Form. Die Prozessstabilität wird durch eine mikrocontrollerbasierte Temperaturregelung mit einem Proportional-Integral-Differential-Regler zusätzlich erhöht [58].

Dörffelt et al. untersuchten die Fertigung sensibler Sensorstrukturen im Mikrospritzgießen unter Einsatz einer hybriden Temperierung mit Heizelementen und Wasserkühlung. Dabei wird die Kavität zunächst auf 135 °C erhitzt und anschließend auf 35 °C abgekühlt. Die rein elektrische Alternative mit Peltier- und Heizelementen zeigt eine hohe Regelgenauigkeit, was für Mikrospritzgießanwendungen von besonderem Vorteil ist [16].

Ebenfalls von Relevanz ist der Einsatz von thermoelektrischen Temperiersystemen im Kontext des Feingießens von Turbinenschaufeln. Bianchi et al. entwickelten eine Lösung zur regionalen Temperatursteuerung bei variablen Waddicken im Keramikspritzgießen. Die gezielte Steuerung mittels Peltier-Modulen und einer optimierten Werkzeuggeometrie ermöglicht eine Reduktion ungleichmäßiger Kühlraten sowie eine Minimierung von Formteilfehlern. Das System erreicht Zykluszeiten, die mit denen von Rapid-Heat-Cooling vergleichbar sind. Zudem wird die Maßhaltigkeit bei unterschiedlich dicken Geometrien verbessert [59].

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die gezielte, lokal steuerbare variotherme Temperierung unter Verwendung von Peltier-Elementen einen signifikanten positiven Einfluss auf die thermische Prozessstabilität sowie die Qualität der Spritzgießenteile ausübt. Diese Erkenntnis wird durch praxisorientierte Anwendungen und experimentelle Studien in verschiedenen Industriebereichen, wie dem Mikrospritzgießen, der Herstellung von mikroelektromechanischen Systemen, dem Feingießen und der Medizintechnik, gestützt. Die Technologie ermöglicht eine hochpräzise Temperaturregelung, was nicht nur zu einer Verkürzung der Zykluszeiten führt, sondern auch die Maßhaltigkeit der Bauteile optimiert und gleichzeitig die Oberflächenqualität signifikant verbessert.

4 Konzeption eines additiv gefertigten Spritzgießwerkzeugs mit integrierter Peltier-Temperierung

4.1 Entwicklung eines Formeinsatzes zur Charakterisierung der Fließfähigkeit

Die Herstellung eines Spritzgießwerkzeugs setzt zunächst die Festlegung eines Funktionsmusters voraus. In der Forschung und Erprobung von Fließeigenschaften kommen in der praktischen Anwendung hierfür diverse Werkzeuge zum Einsatz. Wesentliche Werkzeugkavitäten, die zur Erprobung verwendet werden, sind Platten-, Stufen- oder Spiralkavitäten. Mit der Plattenkavität können die Fließeigenschaften über große Flächen untersucht werden, beispielsweise hinsichtlich der Durchbiegung und von Bindenähten. Im Gegensatz dazu kommen Stufenkavitäten zum Einsatz, um den Einfluss der Materialdicke zu untersuchen. Die Fließspirale dient der Evaluierung der maximalen Fließlänge, die eine Kunststoffschmelze unter festgelegten Bedingungen zurücklegen kann.

Ziel dieser Arbeit ist es, den Einfluss der Peltier-Temperierung auf den Spritzgießprozess zu untersuchen. Deshalb wurde für die experimentellen Versuche eine Fließspirale verwendet, um den Einfluss des Heizens und Kühlens auf die Fließfähigkeit der Formmasse untersuchen zu können. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, die Auswirkungen thermischer und mechanischer Belastungen auf den Wechselformeinsatz zu beobachten. In der Industrie findet die Fließspirale als eine nicht standardisierte Form Anwendung, welche dazu dient, die Fließfähigkeit in Werkzeugen zu untersuchen.

In Abbildung 13 ist die Fließspirale mit Anguss dargestellt. Ihr Volumen beträgt 30.814 mm^3 , ihre Bogenlänge $882,65 \text{ mm}$. Die Tiefe der Fließspirale beträgt 5 mm . Ihre projizierte Fläche beträgt $6.709,03 \text{ mm}^2$. Zur Entformung aus dem Werkzeug ist sie in der Tiefe mit Radien von 3 mm ausgestattet. Der Anguss erfolgt über einen Filmanguss in der Mitte der Schnecke. Zur Fertigung der Fließspirale wird der in der Industrie häufig eingesetzte Kunststoff Polypropylen verwendet.

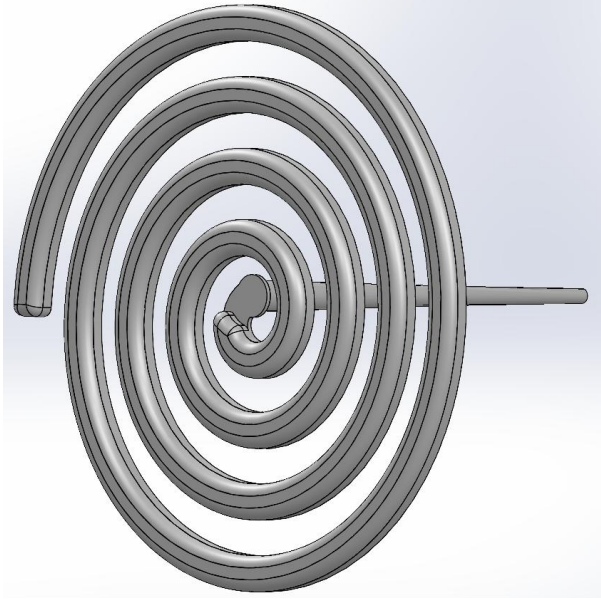


Abbildung 13: Fließspirale mit Anguss

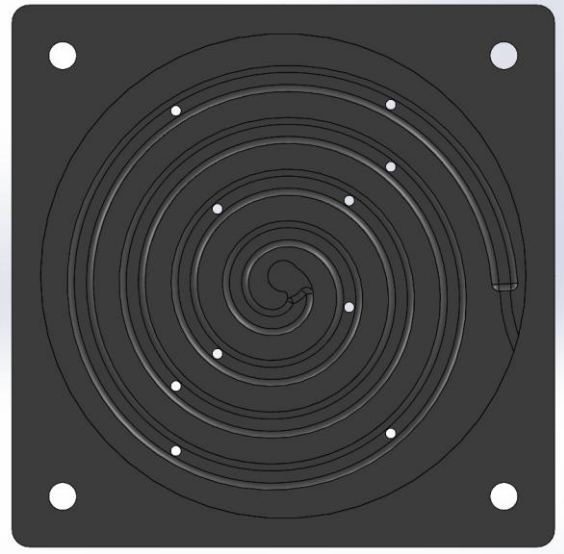


Abbildung 14: Formplatte Fließspirale

Die Fließspirale wird als Kavität in einem Formeinleger eingebracht. Dies erlaubt die Herstellung mehrerer Formeinleger durch verschiedene additive Fertigungsverfahren und ermöglicht einen schnellen Wechsel der Formeinleger innerhalb der Spritzgießmaschine. Die Herstellung von Gewinden erweist sich in einigen additiven Verfahren als problematisch. Aus diesem Grund werden die Formen mit Durchgangsbohrungen mit einem Durchmesser von 8 mm ausgestattet. Die Befestigung der Formeinleger erfolgt mittels eines Sicherungsringes aus dem Stahl C45. Der Aufbau ist in Abbildung 14 dargestellt.

Der Sicherungsring verhindert eine Verschiebung des Formeinlegers. Das Einspritzen der heißen Formmasse erfolgt unter hohem Druck, was zu einer Komprimierung der Luft innerhalb der Kavität führt. Diese komprimierte Luft kann sich am Ende der Kavität selbst entzünden, was als Diesel-Effekt bezeichnet wird. Um diesen Effekt zu unterbinden, wird am Ende der Spirale eine Entlüftung vorgesehen. Die Entformung der Spirale erfolgt über das Auswerfer-System des Werkzeugs. Die Integration der Auswerferstifte in den Formeinleger wird durch das Einbringen von Bohrungen mit einem Durchmesser von 3 h7 mm realisiert.

4.2 Werkstoffauswahl für additiv gefertigte Formeinsätze

Die Auswahl der Ausgangskunststoffe für die additiven Spritzgießformen wird auf Basis der thermischen Eigenschaften getroffen. Für die Verwendung als Formeinsatz werden Materialien mit möglichst hoher Wärmeleitfähigkeit benötigt. Die Wärmeleitfähigkeit von Kunststoffen in der additiven Fertigung wird in Tabelle 2 dargestellt. Die Daten basieren auf verfügbaren Datenblättern der einzelnen Kunststoffsysteme. Neben einer zur effizienten Wärmeabführung notwendigen hohen Wärmeleitfähigkeit, sind auch ein hoher E-Modul sowie Warmformbeständigkeit der verwendeten Kunststoffe von entscheidender Bedeutung. Diese Ansprüche dienen der Gewährleistung der Resilienz der Formeinsätze gegenüber den Schließkräften des Werkzeugs. Die exemplarische Betrachtung der Kennwerte ergibt, dass die mechanischen und thermischen Eigenschaften im Vergleich zu Stahl deutlich geringer sind. Im Bereich der Kunststoffe zeichnen sich Duroplaste durch eine erhöhte Wärmeleitfähigkeit bei gleichzeitig hoher Warmformbeständigkeit aus. Hochleistungskunststoffe, wie beispielsweise PEEK und PEI, zeichnen sich durch eine hohe Warmformbeständigkeit aus. Allerdings ist zu beachten, dass sie aufgrund ihrer hohen Schmelztemperaturen eine erschwerte additive Verarbeitung aufweisen. Eine weitere Beobachtung zeigt, dass sich durch den Einsatz von Füllstoffen, wie beispielsweise Glas- und Kohlefasern, die Warmformbeständigkeit sowie die thermischen Eigenschaften erhöhen lassen. Diese Aussage trifft ebenfalls auf den Einsatz von metallischen oder nichtmetallischen Füllstoffen zu. Die Auswertung der vorliegenden Daten legt nahe, dass im Hinblick auf die Herstellung additiver Formeinsätze eine besondere Berücksichtigung der Verfahren mit duroplastischen Werkstoffen erforderlich ist.

Tabelle 2: Wärmeleitfähigkeit von Kunststoffen in der additiven Fertigung

Kunststoff	E-Modul GPa	Spezif. Wärme- kapazität J/gK	Wärme- leitfähig- keit W/Km	Warmform- beständig- keit 1,8 MPa in °C	Quelle
Stahl C45	210	0,46	50	-	[60]
Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS)	2,3	1,4	0,17	80	[61]
Polyacid (PLA)	3,6	-	0,22	80	[62]
Polyethylenterephthalatglycol (PETG)	2,0	-	0,19	68	[63]
Polyamid mit Kohlefaser (PA11 CF)	5,9	-	-	151	[64]
Polyetheretherketon (PEEK)	3,6	2,16	0,25	152	[65]
Polyetherimid (PEI)	3,2	-	0,24	190	[66]
Duroplast	7,5	1,3	0,3	180	[67]
Duroplast+Glasfaser	140	0,9	0,85	220	[68]
Duroplast+Metallfüllstoff	-	-	0,3-1,4	-	[69]

Auf Grundlage der vorangehenden Analyse sowie der zur Verfügung stehenden additiven Verfahren werden die in Tabelle 3 aufgeführten Kunststoffsysteme für die Berechnung der Kühlzeiten ausgewählt.

Im Rahmen des Vergleichs der additive Formeinsätze mit klassischen Stahlwerkzeugen wird einer der Formeinsätze aus dem Stahl C45W auf einer Fünffachsfräse gefräst. Der vorliegende Formeinsatz findet Anwendung bei der Einrichtung des Werkzeugs nach dessen Konstruktion sowie der Erarbeitung herkömmlicher Prozessparameter. Der Formeinsatz, der im SLS-Verfahren hergestellt wird, besteht aus dem Material Polyamid mit Kohlenstoff (PA 11+CF) der Firma BASF. Im DLP-Verfahren werden zwei Duroplastsysteme, das glasfaserverstärkte Kunstharz Rigid 10K und High Temp der Firma Formlabs verwendet. Der im MJP-Verfahren hergestellten Formeinsatz wird aus VisiJet-HT-250 gefertigt, einem Material, das von der Firma 3D-Concepts hergestellt wird.

Ein detaillierter Vergleich der einzelnen Kunststoffeigenschaften wurde auf Basis von Datenblättern und Vorversuchen in der Tabelle 3 zusammengefasst. Diese bilden die Grundlage für die weitere thermische Auslegung des Werkzeugs. Gemäß Gleichung (6) kann die Wärmespeicherzahl S aus der spezifischen Wärmekapazität und der Dichte ermittelt werden. Die Wärmespeicherzahl gibt Aufschluss über die potenzielle Absorptionskapazität thermischer Energie innerhalb einer spezifischen Temperaturänderung.

Tabelle 3: Thermische Eigenschaften ausgewählter Kunststoffe

Materialeigenschaft	Stahl C45	PA 11 CF	Rigid 10K	VisiJet HT-250	High Temp
Dichte in $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	7850 [60]	1070 [64]	1630 [70]	1100 [71]	1140 [72]
Wärmeleitfähigkeit $\frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$	50 [60]	0,33 [73]	0,18	0,2	0,199 [42]
Wärmekapazität $\frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$	460 [60]	462 (1)	776 (1)	474 (1)	1310 [42]
Wärmespeicherzahl $\frac{\text{J}}{\text{m}^3\cdot\text{K}}$	3.611.000 (2)	1.391.000 (2)	1.567.500 (2)	1.493.400 (2)	1.493.400 (2)

(1 eigene Messungen) (2 berechnet)

4.3 Thermische Analyse und Auslegung der Temperierung in additiv gefertigten Spritzgießwerkzeugen

4.3.1 Analytische Berechnung der Kühlzeit

Die Kühlzeit stellt im Spritzgießprozess einen wichtigen Parameter dar, sodass eine Berechnung dieser für die jeweiligen Formeinsätze notwendig ist. Die analytische Berechnung erfolgt unter Verwendung des Excel-Berechnungstools und beinhaltet drei verschiedene Schätzformeln für die Kühlzeit. Die Formmasse wird mit einer Temperatur von 210 °C in die Form eingespritzt. Die Werkzeugwandtemperatur wird im eingeschwungenen Zustand auf 30°C geschätzt. Laut Hopmann kann die Entformung von

Teilen aus PP bei einer mittleren Temperatur von 70 °C aus dem Formwerkzeug erfolgen. [2]

Das Excel-Tool offeriert die Option, die mittlere Kühlzeit nach Hopmann zu errechnen. Die Berechnung der Kühlzeit ist nach Kapitel 3 im hohen Maß von der gleichmäßigen Werkzeugkontakttemperatur zwischen Formmasse und Werkzeug abhängig. Weiterhin wird eine Wärmeleitung in eine Richtung und eine gute Wärmeleitfähigkeit vorausgesetzt. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, die Formel als Schätzformel in einer praxisnahen Weise zu vereinfachen. Ein weiterer Ansatz zur Berechnung der Kühlzeit von additiven Kunststoffwerkzeugen, der von Gerke vorgestellt wird, basiert auf einer spezifischen Schätzformel zur Ermittlung der Kühlzeit [74]. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wird der Einfluss des spezifischen Werkzeugmaterials auf die Abkühlzeit des betreffenden Bauteils analysiert. Die Resultate der Berechnungen sind in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Analytischen Kühlzeitberechnung der Fließspirale

	Stahl C45	PA 11 CF	Rigid 10K	VisiJet HT-250	High Temp
Vereinfachte Schätzformel	50,00				
Kühlzeitformel nach Hopmann	21,02				
Kühlzeitformel für Kunststoffwerkzeugträger nach Gerke	27,68	96,51	152,93	158,16	158,93

Es wird ersichtlich, dass die ersten beiden Berechnungsmethoden unabhängig vom Einsatz des Werkzeugmaterials sind. Dies ist dadurch bedingt, dass sie für metallische Formwerkzeuge gelten und eine konstante Werkzeugwandtemperatur sowie eine hohe Wärmeleitfähigkeit voraussetzen. Die Kühlzeit ist von dem zu verarbeitenden Kunststoff abhängig. Die Formel (7) nach Gerke hingegen erlaubt eine Schätzung, bei der signifikante Unterschiede zwischen den Werkzeugmaterialien festgestellt werden können. In Bezug auf die Auslegung einer Peltier-Kühlung für ein adaptive Kunststoffwerkzeug erweist sich die Berechnung nach Gerke als geeignet.

4.3.2 Numerische Berechnung der Kühlzeit

Zur Ermittlung eines Vergleichswerts zur analytischen Kühlzeitberechnung der Fließspirale wird zusätzliche eine numerische Kühlzeitsimulation durchgeführt. Die numerische Berechnung der mittleren Kühlzeit erfolgt unter Verwendung der Software Solidworks Plastics. Durch den Import der Geometrie der Spirale wird in der Simulationssoftware das Modell des Werkzeuges aufgebaut. Für die numerische Simulation der Kühlzeit ist die Integration eines Kühlkanals in das Werkzeugmodell zwingend erforderlich.

In Anbetracht der Tatsache, dass sich in den Formplatten keine Kühlkanäle befinden, wird am Rand ein kleiner Kühlkanal mit Durchmesser 1 mm und einer Länge von 10 mm eingefügt. Als Medium für des Kühlkanal wird Luft mit einem Volumenstrom von $0,1 \text{ cm}^3$ pro Sekunde verwendet. Der Kühlkanal hat somit keinen Einfluss auf die Abkühlung des Werkzeuges.

In SolidWorks Plastics besteht keine Möglichkeit, das Kavitätsmaterial partiell zu definieren. Aus diesem Grund wird lediglich der Kunststoffeinsatz validiert. Eine Analyse der Auswirkungen auf den Formträger ist innerhalb der Software nicht durchführbar.

Dementsprechend wird die Größe des additiven Kunststoffformeinsatzes als Trägerwerkzeug festgelegt. Diese hat einen Einfluss auf die Kühlzeit des Bauteils und die thermische Kapazität des Formeinsatzes. Die Gesamte Größe der Formeinsätze besteht aus der Anguss- und Auswerferseite mit den Maßen 156,5 mm x 156,5 mm x 25 mm.

Innerhalb jeder Simulation soll das Werkzeugmaterial verändert werden. Hierzu werden in der Simulation die Profile der jeweiligen Werkzeugmaterialien angelegt. Die angelegten Werkstoffkennwerte sind in Tabelle 5 angegeben. Als Referenzwerkstoff zur Validierung der Simulation und als Vergleichsbasis wird der Stahl C45 ausgewählt.

Tabelle 5: Materialkennwerte für die numerische Kühlzeitberechnung

	Stahl C45	PA 11 CF	Rigid 10K	VisiJet HT-250	High Temp
Dichte in kg/m^3	7850	1070	1630	1100	1140
Spezifische Wärmekapazität $\text{J/g}^\circ\text{K}$	460	1300	950	1310	1310
Wärmeleitfähigkeit $\text{W}/(\text{m}^\circ\text{K})$	50	0,33	0,2	0,2	0,199
Wärmeausdehnungskoeffizient $1/\text{K}$	$11,1 \cdot 10^{-6}$	$40,0 \cdot 10^{-6}$	$50,0 \cdot 10^{-6}$	$70,0 \cdot 10^{-6}$	$70,0 \cdot 10^{-6}$
E-Modul Mpa	210000	2000	10000	2800	2750
Scherm modul MPA	80000	1500	3000	1400	1400
Quelle	[60]	[64]	[70]	[71]	[69, 72]

Die Simulation der Kühlzeit erfolgt mit einem Profil eines PP von Borealis. Es wird angenommen, dass der Kunststoff mit einer Temperatur von 210°C in das Werkzeug eingespritzt wird. Die maximale Zuhaltekraft des Werkzeuges wird mit 1800 kN festgelegt. Die Entformungstemperatur für die Spritzspirale wird auf 70°C festgesetzt. Im letzten Schritt wird das Modell in 41326 Elementen und 10800 Knoten vernetzt. Das Resultat der Vernetzung der Kavität, Kühlkanäle und Werkzeugformeinsätze ist in Abbildung 15 dargestellt.

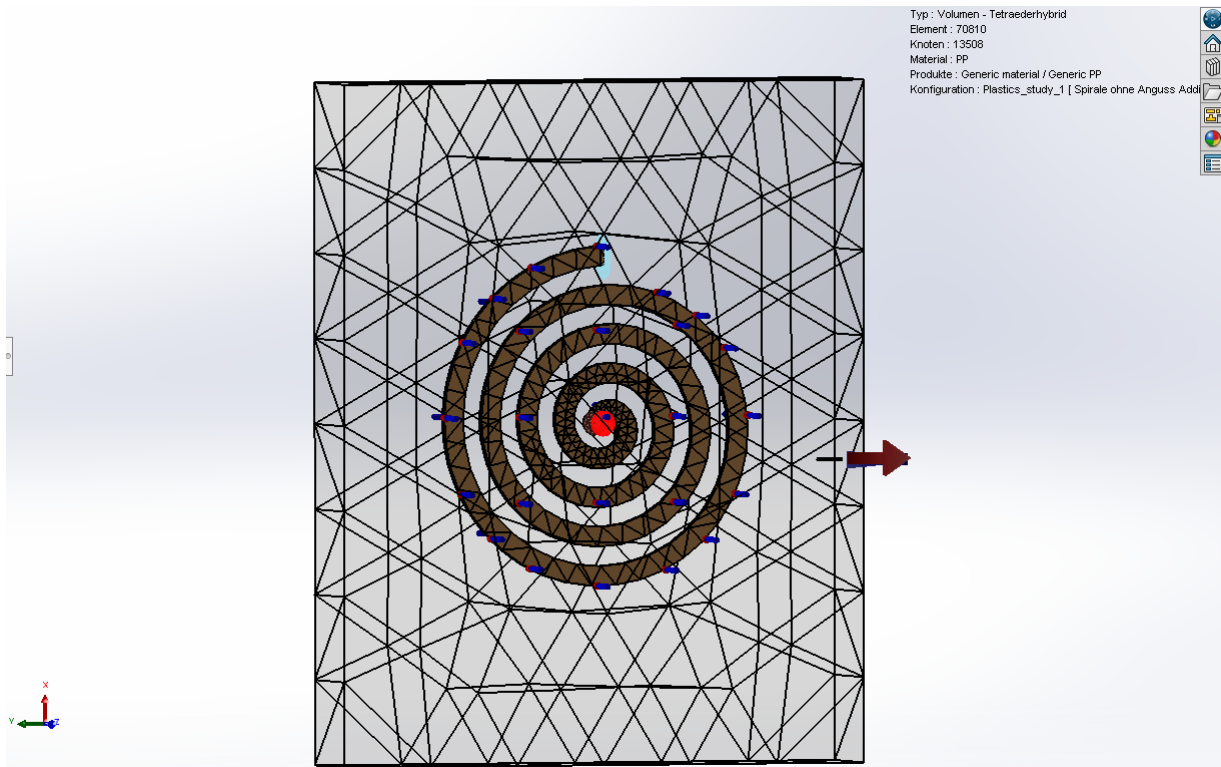


Abbildung 15: Simulationsmodell in SolidWorks Plastics

Die mittels numerischer Simulation ermittelten mittleren Kühlzeiten sind in Tabelle 6 dargestellt. Die umfangreiche Auswertung der einzelnen Formeinsatzmaterialien ist in den Anhang 1 bis Anhang 5 einsehbar.

Tabelle 6: Numerische Kühlzeitberechnung mit SolidWorks Plastics

Material	Mittlere Abkühlzeit in s				
	Stahl C45	PA 11 CF	Rigid 10K	VisiJet HT-250	High Temp
Fließspirale	19,70	230,45	387,31	356,84	359,29

Die aus der Simulation resultierenden mittleren Kühlzeiten für die verschiedenen Kunststoffmaterialien ähneln jeweils den zuvor nach der Schätzformel von Gerke berechneten Werten. Die Unterschiede der Werkstoffe hinsichtlich der simulierten Kühlzeiten sind als marginal einzustufen. Für eine adäquate Schätzung wird demnach die Formel nach Gerke für die weitere Berechnung der Kühlleistung bevorzugt.

4.3.3 Thermische Bilanzierung des additiv gefertigten Werkzeugformeinsatzes

Gemäß Hopmann wird die Berechnung der Wärmemenge durch die Zykluszeit determiniert. Die Zykluszeit ergibt sich demnach aus der berechneten Kühlzeit und der Einspritzzeit. In den vorliegenden Untersuchungen wird eine feste Dauer von zwei Sekunden für die Einspritzzeit festgelegt. In diesem Fall wird die Öffnungszeit des Werkzeugs, welches zum Entformen der Spirale dient, vernachlässigt. Zur Abschätzung der

Wärmebilanz erfolgt die Berechnung des Belastungsfalls. Für die vorliegende Untersuchung wird die Kühlzeit für die jeweiligen Materialien aus der Berechnung nach Gerke herangezogen. Die Resultate werden mithilfe des Berechnungsinstruments ermittelt und resultieren in den in Tabelle 7 dargestellten erforderlichen Kühlleistungen.

Tabelle 7: Wärmestrombilanz für einzelne Formkunststoffe

	Stahl C45	PA 11 CF	Rigid 10K	VisiJet HT-250	High Temp
T_k nach Gerke in s	27,95	96,51	152,93	158,16	158,93
Q_{KF} nach Gerke in W	344,30	104,69	66,56	74,223	64,077
Q_S in W	0,001				
Q_L in W	71,830				
Q_{Konvek} in W	3,721				
Q_C nach Gerke in W	268,75	29,13	-8,99	-11,17	-11,48

Des Ergebnisses der Berechnung zeigt, dass die Stahlform die höchste Kühlleistung benötigt. Im Gegensatz dazu benötigen die Formwerkzeuge aus Kunststoff deutlich weniger bis gar keine Kühlleistung. Die geringe Kühlleistung resultiert aus der Aufteilung der eingebrachten Energie Q_{KF} über die gesamte Zykluszeit. Da Aufgrund der schlechteren Wärmeleitfähigkeit von Kunststoffen weniger Wärme aus der Schmelze an die Umgebung abtransportiert werden kann erfolgt eine langsamere Abkühlung des Spritzlings. Da es sich bei der Abschätzung der Kühlleistung um eine stationäre Bilanzierung handelt ist die Verwendung einer Kühlzeit auf Basis einer numerisch hergeleiteten Formel unter temperaturveränderlichen Eigenschaften nicht möglich. Entsprechend müsste der Ansatz von Gerke zur Abschätzung der Kühlleistung erweitert werden.

Ein alternativer Lösungsweg ist die Berechnung des Kühlleistung unter stationären Bedingungen auf Basis einer erforderlichen Kühlleistung im Werkzeug. Die nachfolgende Tabelle 8 zeigt die Auswirkung der Kühlzeit auf die erforderliche Kühlleistung im Werkzeug für die Fließspirale. Auf Basis der stationären Berechnung mit gewählter Kühlzeit zeigt sich, dass bei höheren Kühlzeiten dem System mehr Energie entzogen wird und sich das Werkzeug abkühlt. In diesem Fall muss das Werkzeug mit keiner weiteren Kühlung ausgestattet werden.

Tabelle 8: Mögliche abzuführende Wärme bei gewählter Kühlzeit

Gewählte Kühlzeit in s	Abzuführende Wärmemenge Q_C in W
10	783,77
20	393,17
40	169,97
80	50,20
160	-11,90

4.3.4 Entwurf und Integration einer Peltier-Element-Kühlung im Formwerkzeug

Die Peltier-Temperierung kann auf Basis des erforderlichen Kühlleistungswärmestroms konfiguriert werden. Die Berechnungen basieren auf den maximalen Werten der Wärmemenge, die in Kapitel 4.3.3 ermittelt wurden. Für die Auslegung des Peltier-Elements wurde ein marktübliches Material für die Herstellung von Peltier-Elements aus Blei-Tellurid ausgewählt. Die vorliegende Kombination wird in herkömmlichen Elementen verbaut. Die einzelnen Elemente werden aus bestehenden Systemen entnommen. Die Elemente bestehen aus Halbleiter-Blöcken mit einer Größe von 2,2 mm Länge, 2,2 mm Breite und einer Tiefe von 1,7 mm sowie Brücken aus Kupfer mit einer Länge von 1,7 mm, Breite von 1 mm und Dicke von 0,5 mm. In dem erstellten Excel-Tool erfolgt der Rückgriff auf die Formel aus Kapitel 2, um die erforderliche Anzahl der Peltier-Elemente zu ermitteln. Die Ergebnisse der einzelnen Berechnungen nach den erforderlichen Kühlzeiten sind in Tabelle 9 dargestellt.

Tabelle 9: Benötigte Peltier-Elemente nach Werkstoff

	Stahl C45	PA 11 CF	Rigid 10K	VisiJet HT-250	High Temp
Anzahl der Peltier-Elemente auf Basis der Schätzung nach Gerke:	230	25	0	0	0

Die Resultate demonstrieren, dass bei einer kurzen Kühlzeit eine signifikante Anzahl an Peltier-Elementen erforderlich ist, um die Wärme aus der Kavität abzutransportieren und in die Wärmekapazität des Trägers zu transferieren. Im Gegensatz dazu ist bei additiven Formwerkzeugen aufgrund ihrer Kühlzeit keine Kühlung erforderlich. Es ist zu beachten, dass im Gegensatz zur Wassertemperierung kein Abtransport der Wärme aus dem Werkzeug stattfindet. Der Abtransport erfolgt ausschließlich durch Konvektion, Wärmestrahlung und Wärmeleitung. Daraus folgend führt der Prozess zu einer kontinuierlichen Erwärmung des Werkzeugs bis zum Einstellen eines thermischen Gleichgewichtes. Die Auslegung des adaptiven Peltier-Elementes erfolgt im Weiteren auf Basis der Anzahl an benötigten Peltier-Elementen für ein Stahlwerkzeug.

5 Fertigungstechnische Umsetzung des Trägerwerkzeuges

Das Ziel der vorliegenden Arbeit besteht in der additiven Fertigung eines Formeinsatzes, welcher zur Herstellung einer Fließspirale gemäß Kapitel 4.1 dient. Als Trägerwerkzeug wird ein Wechselformwerkzeug FW 296x346 der Firma Meusburger verwendet. Das Werkzeug ist in Abbildung 16 dargestellt und weist die Außenmaße 346 mm × 346 mm × 307,8 mm auf. Das vorliegende Werkzeug ist als 1-Komponenten-Normalwerkzeug klassifiziert und weist eine Aufteilung in eine Auswerfer- und Angussseite auf. Der Anguss der Schmelze erfolgt im Mittelpunkt der Trennebene des Werkzeuges. Die Zentrierung des Werkzeuges auf den Aufspannplatten erfolgt durch Zentrierflansch, deren Außendurchmesser 160 mm beträgt.

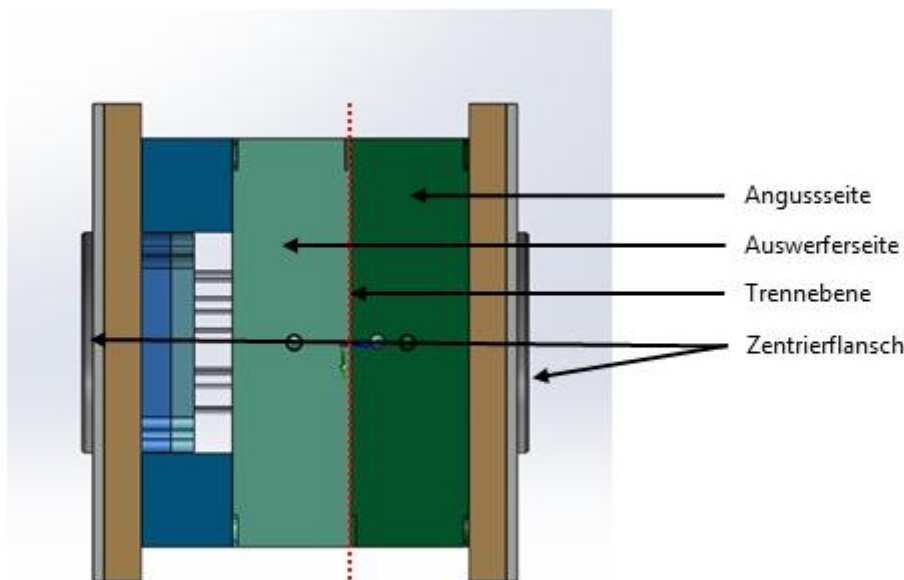


Abbildung 16: Außenansicht des Spritzgießwerkzeuges

Die Angussseite des Werkzeuges ist in Abbildung 17 dargestellt. Das Bild veranschaulicht die Konstruktion des Wechselformwerkzeuges, welche den Werkzeugträger auf der Aufspannplatte und Wärmeschutzplatte zeigt. Das Trägerwerkzeug dient zur Aufnahme der Kavität. Die Aufspannplatten ermöglichen die Montage des Werkzeuges in der Spritzgießmaschine. Im vorliegenden Trägerwerkzeug sind vier Führungssäulen eingepresst, welche dazu dienen, die Zentrierung des Werkzeuges zur Auswerferseite zu ermöglichen. In dem vorliegenden Werkzeugträger ist ein Wechselformeinsatz montiert, dessen Positionierung durch zwei Sicherungskeile erfolgt. Im Rahmen des Einsatzes wird in den Wechselformeinsatz ein Quadrat mit einer Tiefe von 156,5 x 146,5 x 10 mm durch Fräsen eingebracht. Zur einfachen Fertigung des Formeinsatzes werden die Eckpunkte mit einem Radius von 5 mm versehen. Zur Gewährleistung der Sicherheit des Kühlelements wird eine Schutzplatte konstruiert, die die Funktion hat, das Peltier-

Modul vor der Schließkraft und dem Einspritzdruck zu schützen. Darüber hinaus werden im Werkzeugträger Bohrungen mit 10 mm implementiert, um eine elektrische Stromversorgung des Peltier-Modules zu gewährleisten. Die Kavität wird über den Anguss mit Formmasse gefüllt. Als Anguss wird die E1741-Düse des Herstellers Meusburger mit einer Länge von 120 mm und einem Außenradius von 18 mm verwendet. Der kegelförmige Bohrungsdurchmesser der Düse weist einen Startdurchmesser von 4,2 mm auf und erweitert sich über eine Länge von 104 mm auf 7,64 mm. Der Anguss weist demzufolge ein Volumen von $2759,06 \text{ mm}^3$ auf, welches für jeden Zyklus dem Bauteil zu addieren ist. Die Addition der beiden Volumina resultiert in dem zur Herstellung des Bauteils erforderlichen Schussvolumen von $33.572,06 \text{ mm}^3$. Darüber hinaus besteht die Option, Sensoren im Inneren des Werkzeugs zu positionieren. Der Aufbau der integrierten Peltier-Temperierung wird in Kapitel 6.2 und Kapitel 7 beschrieben.

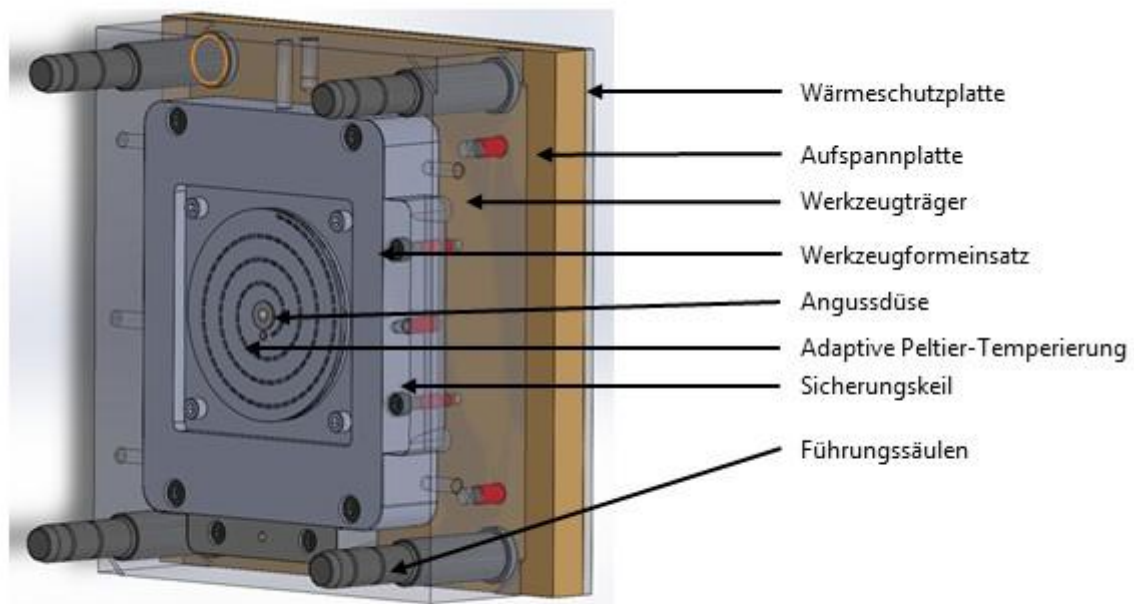


Abbildung 17: Aufbau der Angussseite des Trägerwerkzeugs

Die Abbildung 18 veranschaulicht die Auswerferseite des Trägerwerkzeuges. Das System setzt sich aus dem Formträger, dem additiven Formeinsatz, einer Werkzeugkühlung und dem Auswerfersystem zusammen. In den Formträger wird ein Formeinsatz aus Stahl eingesetzt und wie auf der Angussseite durch zwei Keile im Trägerwerkzeug positioniert. Um eine präzise Bewegung der Formhälften zueinander zu gewährleisten, werden darüber hinaus die Führungsbuchsen für die Führungssäulen der Angussseite eingebaut. Im hinteren Teil ist der Träger mit zwei Leisten aus Stahl mit der Aufspannplatte verschraubt. Die Blöcke dienen der Schaffung eines Platzes für das Auswerfersystem. Das Auswerfersystem besteht aus zwei verschraubten Platten

zwischen welchen die Auswerferstifte geklemmt sind. Das Auswerferpaket wird auf Führungstiften gelagert. Die Aufgabe dieser Stifte besteht darin, die Spirale aus dem Formeinsatz zu entformen. Zu diesem Zweck wird das Auswerferpaket mittels einer Koppelstange und des Auswerfersystems der Spritzgießmaschine in eine vordere und hintere Position bewegt. Der additive Formeinsatz, dessen Abmessungen 156,5 mm in der Länge, 156,5 mm in der Breite und 15 mm in der Tiefe betragen, ist in den Formeinsatz montiert. Der Formeinsatz wird mittels eines Sicherungskeils gegen Verdrehung gesichert. Zudem erfolgte eine Verschraubung mit dem Stahlträger.

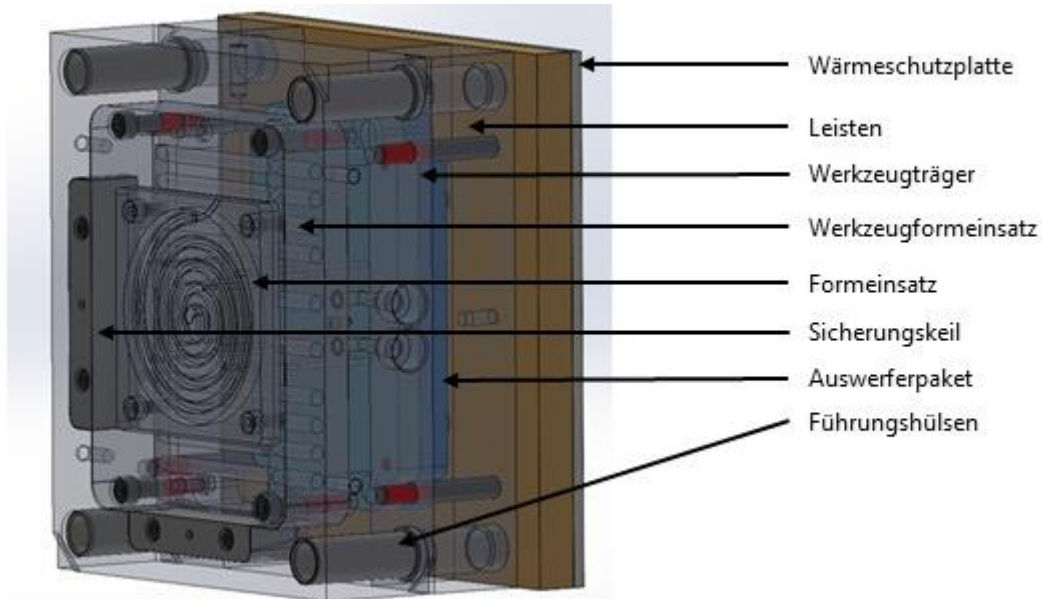


Abbildung 18: Aufbau der Auswerferseite des Trägerwerkzeugs

6 Experimentelle Untersuchung der Peltier-Kühlung in additiv gefertigten Kunststoffformeinsätzen

6.1 Integration des Peltier-Moduls

Gemäß dem aktuellen Stand der Technik werden Peltier-Module eingesetzt, um die Temperatur von Spritzgießwerkzeugen zu regulieren. Zur Veranschaulichung des Effekts der Temperierung wird ein Formeinleger mit zwei Fließplatten konstruiert, wie in Abbildung 19 dargestellt. Der Prozess des Fließens der Kunststoffschmelze in die Plattenkavität wird durch die Verwendung eines Filmangusses ermöglicht. Der Formeinleger ist für das Gießen von Platten aus Kunststoff mit einer Dicke von 3 mm konzipiert. Die Abmessungen der Platte entsprechen den Abmessungen des Peltier-Moduls, welches mit einer Länge von 60 mm, Breite von 63 mm und einer Dicke von 4 mm angegeben werden. Die Kavität zeichnet sich durch eine symmetrische Struktur aus, die einen Vergleich zwischen einer nicht temperierten und einer temperierten Kavität ermöglicht. Das Volumen an Kunststoffschmelze, welches in den Platten-Formeinleger mit Anguss gefüllt werden kann, beläuft sich auf $26.899,05 \text{ mm}^3$. Der Plattentestkörpers ist in Abbildung 20 dargestellt. Die gesamte projizierte Fläche des Bauteils beträgt $4169,27 \text{ mm}^2$.

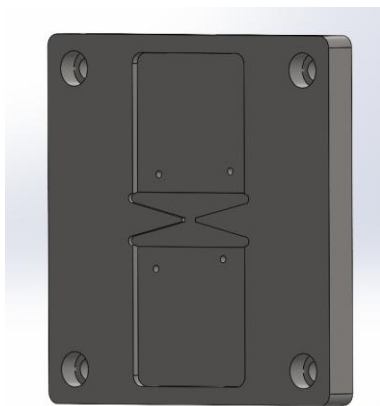


Abbildung 19: Plattenkavität auf der Auswerferseite

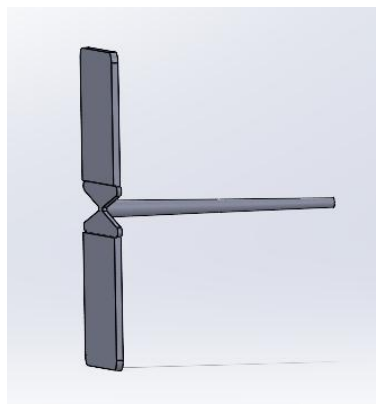


Abbildung 20: Geometrie des Plattentestkörpers

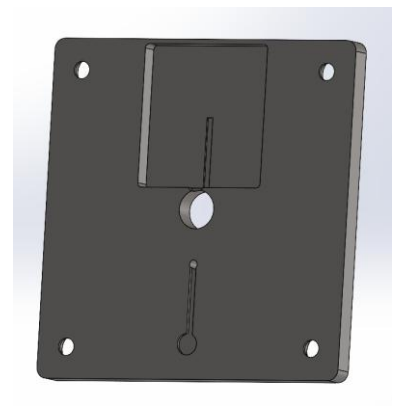


Abbildung 21: Rückseite der Angussseite

Auf der Angussseite wird eine ebene Platte in das Trägerwerkzeug eingebracht. Die Konstruktion des Formeinlegers für die Angussseite ist in Abbildung 21 dargestellt. Das Peltier-Modul wird in eine Tasche eingelegt und durch eine Platte von hinten abgestützt. Die Angussseite, Peltier-Modul und Stahlplatte werden dabei mit einem Epoxid Harz verbunden. Die Senkung in der Tasche sowie die Bohrung auf der gegenüberliegenden Seite dienen der Temperaturmessung innerhalb des Werkzeuges auf der Tiefe von 2mm. Die geraden Kanäle dienen zur Verlegung von Leitungen für die Thermoelemente, um ein Abscheren der Leitungen zu verhindern.

6.2 Versuchsaufbau und Bestimmung der Prozessparameter

Die Erprobung des Werkzeuges erfolgt auf einer Spritzgießmaschine des Typs IntElect2 180-450 der Firma Sumitomo Demag. Diese Spritzgießmaschine weist eine maximale Schließkraft von 180 t bzw. 1.800 kN auf und erreicht eine Schließgeschwindigkeit von 450 mm/s. Das maximale Einspritzvolumen beträgt 154 cm³ bei einem maximalen Spritzendruck von 2790 bar. Im Rahmen der durchgeführten Untersuchung wird als Kunststoff Polypropylen (PP) des Typs "Daploy WB140HMS" der Firma Borealis verwendet. Gemäß den vorliegenden Daten beträgt die Verarbeitungstemperatureinstellung dieses Materials 210 °C, wobei ein Mold Flow Index von 2,1 registriert wurde [75]. Diese Annahme legt nahe, dass das Material eine hohe Viskosität aufweist und folglich eine eingeschränkte Fließfähigkeit in die Form aufweist. Um einen Vergleich zu den Berechnungen zu erhalten wird die Temperatur der Formmasse auf 210 °C eingestellt. Der Einspritzgeschwindigkeit werden auf 60 cm³/s eingestellt mit einem maximalen Einspritzdruck von 260 bar. Im Vorfeld der Untersuchung wurde mit Hilfe der Simulationssoftware SolidWorks-Plastics eine Füllsimulation durchgeführt, um das Formfüllungsvermögen zu simulieren. Die Resultate der Füllsimulation sind in Abbildung 22 zu sehen und zeigen das die Form innerhalb von 3,4 s gefüllt werden kann.

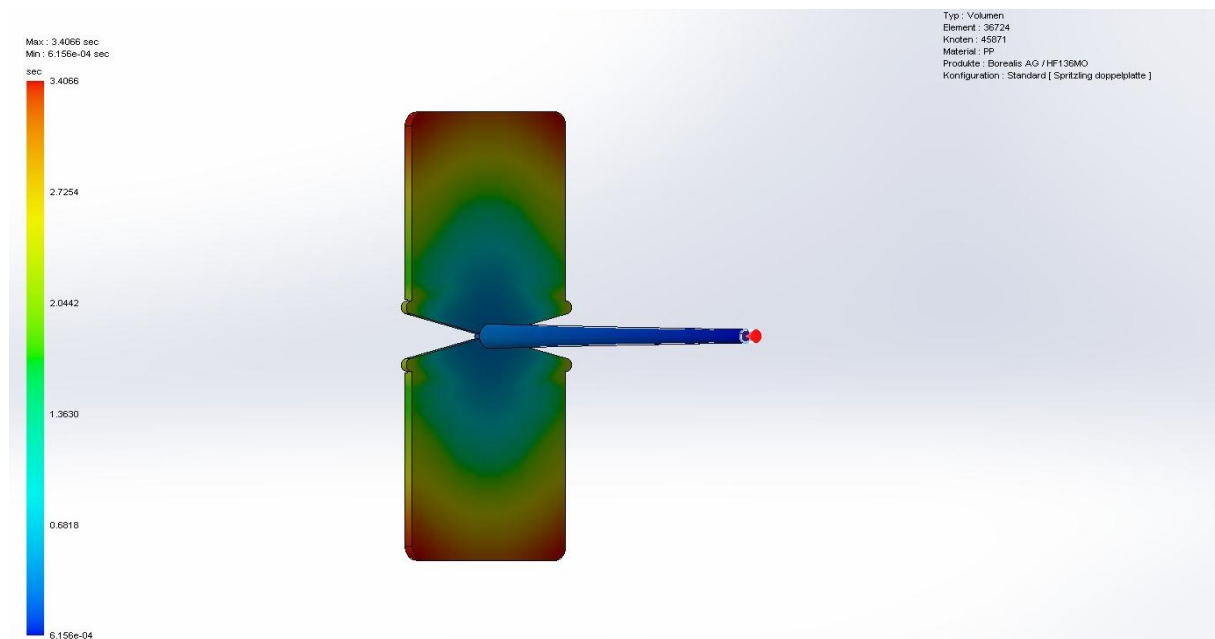


Abbildung 22: Füllstudie des Plattenwerkzeuges

Die Temperierung der Formmasse erfolgt am Trichter mit 45 °C, Heizzone 1 mit 195 °C, Heizzone 2 mit 210 °C, Heizzone 3 mit 220 °C und an der Düse mit 235°C. Die erforderliche Schließkraft des Werkzeuges kann gemäß der Formel (25) auf Grundlage der projizierten Fläche des Plattenkörpers sowie des Einspritzdrucks der Schmelze mit 416,93 kN ermittelt werden.

$$F = p \cdot A \quad (25)$$

Der Versuch orientiert sich am konventionellen Zyklus, wie in Kapitel 2.1.1 beschrieben, und wird auf der Spritzgießmaschine wie folgt programmiert. Im ersten Schritt werden die Auswerfer eingefahren. Im darauffolgenden Schritt wird das Werkzeug geschlossen und es wird eine Schließkraft von 450 kN aufgebracht, wodurch eine entsprechende Sicherheitsreserve gewährleistet wird. Im darauffolgenden Schritt wird die Einspritzeinheit an das Werkzeug gefahren und die flüssige Kunststoffschmelze mit Einspritzgeschwindigkeit in die Form injiziert. Im Anschluss erfolgt der Nachdruck auf das Bauteil, mit dem Ziel, dessen Schwindung zu reduzieren. Im nächsten Schritt läuft die berechnete Kühlzeit für Stahl und Rigid 10K aus Kapitel 4.3.1 ab. In der Folge wird der Dosierprozess initiiert und nach Abschluss die Einspritzeinheit zurückgefahren. Nach Verstreichen der Kühlzeit kann das Werkzeug geöffnet werden, sodass das Bauteil durch die Auswerferstifte aus der Form entformt werden kann.

Die Untersuchung erfolgt zunächst mit der Kavität aus Stahl auf der Auswerferseite und auf der Angussseite mit einer Stahlplatte ohne Kühlung, um eine Füllstudie im Werkzeug durchzuführen. Das Ergebnis der Füllstudie ist in Abbildung 23 dargestellt, um passende Prozessparameter zu evaluieren. Die Prozessparameter wurden auf eine Füllmenge von 35 cm³, ein Einspritzdruck von 300 bar und einen Nachdruck von 600 bar festgelegt. Die Schließkraft wurde auf 400 kN festgelegt.



Abbildung 23: Füllstudie des Plattenformeinsatzs aus Stahl

In der Folge wird in den Formeinsatz aus Stahl ein Peltier-Modul integriert, um den Einfluss einer aktiven Kühlung auf den Fertigungsprozess zu untersuchen. In einem nachfolgenden Versuch werden beide Formeinsätze mit identischer Geometrie durch additiv gefertigte Formeinsätze aus dem Photopolymer Rigid 10K ersetzt. Das Material zeichnet sich durch eine hohe Steifigkeit und Temperaturbeständigkeit aus, ist jedoch im Vergleich zu Stahl spröder und mechanisch weniger belastbar. Ziel der Untersuchung ist die systematische Analyse des Einflusses einer gezielten Temperierung auf ein additiv gefertigtes Formwerkzeug. Als Abbruchkriterium für den Einsatz des additiv gefertigten Werkzeugs werden Rissbildungen im Formeinsatz sowie das Ausbrechen

von Segmenten im Angussbereich definiert. Die aufgeführten Kriterien stellen charakteristische Schadensbilder dar, die bei der Verwendung spröderer Werkstoffe unter wechselnden thermischen und mechanischen Belastungen entstehen. Sie gestatten eine eindeutige Beurteilung der Standzeit.

6.3 Untersuchung des transienten Temperaturverlaufs im variothermen Formeinsätzen

Zur Messung der Temperatur während der Zykluszeit werden zwei Thermoelemente an der heißen und der kalten Seite des Peltier-Moduls positioniert. Es kommen Thermoelemente vom Typ K zum Einsatz, die aus Nickel-Chrom (positiver Leiter) und Nickel-Aluminium (negativer Leiter) bestehen und für Temperaturmessungen bis ca. 200 °C geeignet sind. Zusätzlich wird in eine Bohrung der nicht temperierten Kavität ein drittes Thermoelement eingebracht, um die Werkzeugtemperatur im Bereich der Kavität zu erfassen. Dabei wird ein Sicherheitsabstand von 1 mm zur Kavitätsoberfläche eingehalten, um mechanische Beeinträchtigungen des Bauteils oder Messstörungen zu vermeiden. Die Datenerfassung erfolgt mittels eines „midi LOGGER GL220“ der Firma dataTec. Die Temperaturverläufe werden über die gesamte Zykluszeit mit einer Abtastzeit von 250 ms kontinuierlich aufgezeichnet. Die Thermoelemente werden im Formträger montiert; die Anschlusskabel werden hierzu durch gezielt gesetzte Bohrungen im Werkzeug geführt. Der Formeinsatz wird über die Angussbuchse zentriert. Die Abbildung 24 veranschaulicht den Aufbau der Werkzeughälften des Werkzeugs. Die Abbildung auf der rechten Seite zeigt die Rückseite des Formeinsatzes, die Angussseite in der Vergrößerung, die Integration des Peltier-Moduls sowie die verbauten Thermoelemente. Des Weiteren sind im Hintergrund sowohl die Wärmebildkamera als auch der Datenlogger zu sehen.

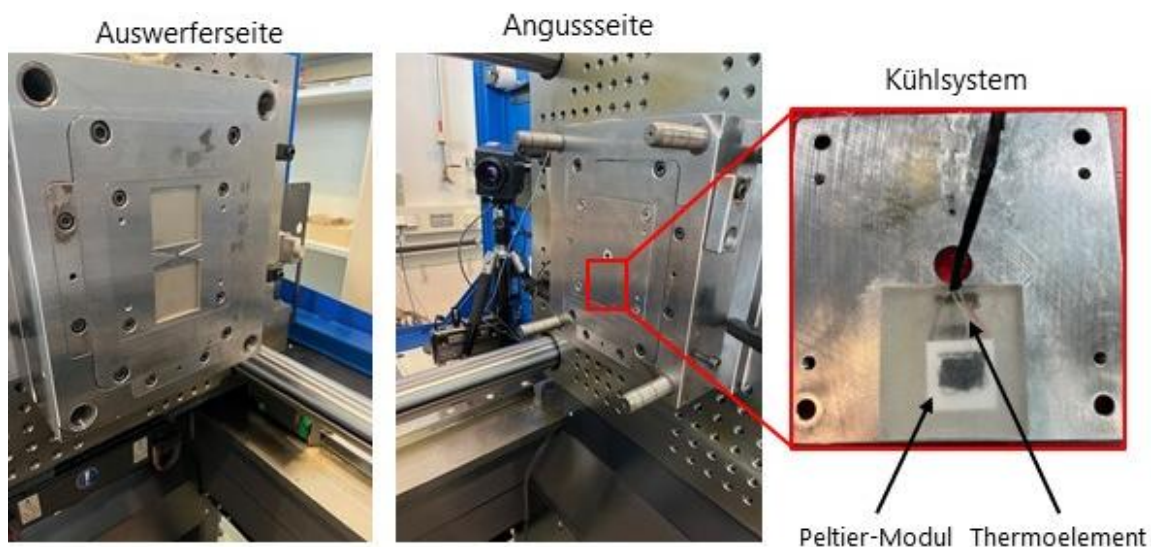


Abbildung 24: Versuchsaufbau zur Erprobung der Formeinsätze

Bei der Montage ist sicherzustellen, dass die Befestigungsschrauben mit einem gleichmäßigen Drehmoment über Kreuz angezogen werden. Dadurch wird eine gleichmäßige Auflage des Formeinsatzes erreicht und eine Scherbelastung durch Verzug bei der Montage auf das Peltier-Modul vermieden, die zu einer Funktionsbeeinträchtigung führen könnte.

Zur Untersuchung der Funktionsfähigkeit des Peltier-Moduls nach dem Einbau sowie zur Ermittlung der Betriebsparameter wird der Formeinsatz aus Stahl an eine regelbare Spannungsquelle angeschlossen. Im Anschluss erfolgt die Messung der Wirkung des Moduls auf die Temperatur der Werkzeugoberflächen bei einer Umgebungstemperatur von 25 °C unter der Versorgungsspannung von 0,5 V und 0,230 A. Die Wahl der Parameter erfolgt unter Berücksichtigung der Vorgaben aus dem Datenblatt des Herstellers [76]. Bei einer Spannung von 0,5 V, wird eine Temperatur von 80 °C auf der kalten Seite erreicht, dass dem Ziel von etwa 70 °C Entformungstemperatur entspricht. Das Diagramm in Abbildung 25 zeigt der orange Temperaturverlauf die heiße Seite und blau die kalte Seite des Peltier-Modules. Der graue Graph zeigt die konstante Temperatur der Werkzeugtemperatur im nicht temperierten Bereich des Formeinsatzes an. Im Gegensatz dazu führt der Betrieb der kalten Seite zu einer Verringerung der Temperatur um 1,8 K. Im Gegensatz dazu steigt die Temperatur auf der heißen Seite des Peltier-Moduls stetig an. Ab 60 s ist außerdem eine Erwärmung der kalten Seite zu beobachten. Diese ist auf die Wärmeleitung auf der heißen Seite zurückzuführen. Jedoch ist zu beachten, dass der Wärmepumpeffekt eines Peltier-Elementes abhängig von der vorliegenden Temperaturdifferenz ist. Aufgrund der geringen Wirkung auf der Werkzeugoberfläche konnte kein Thermogramm von der Form erstellt werden.

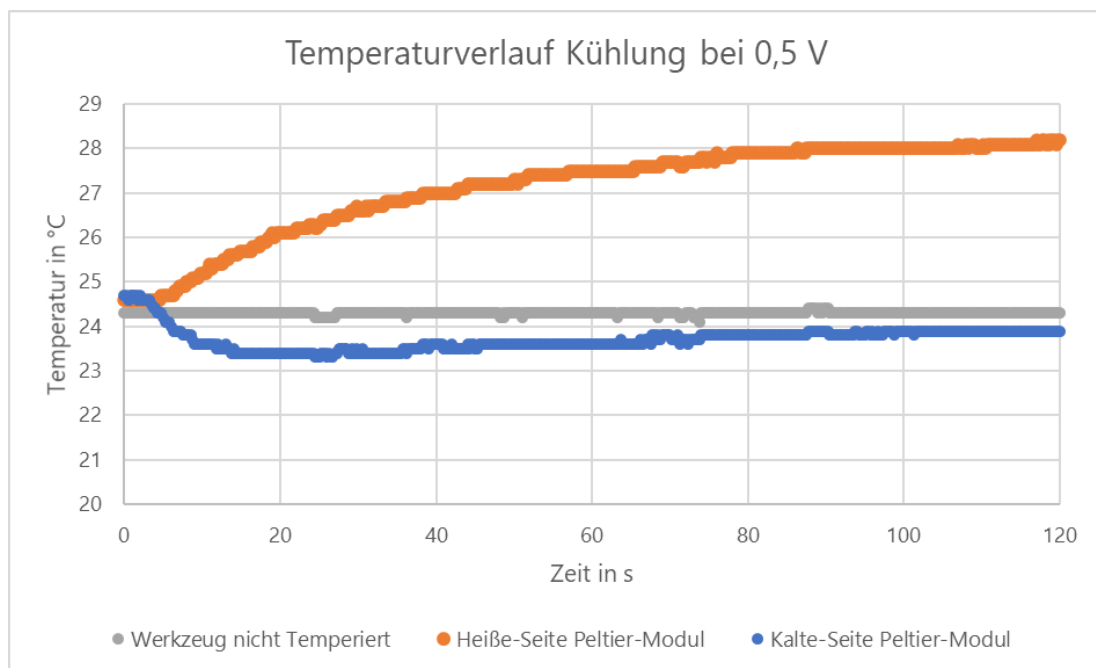


Abbildung 25: Temperaturverlauf des Stahleinsatzes bei 0,5 V und 20 °C

Die Abbildung 26 veranschaulicht den Temperaturverlauf während der Erprobung im Spritzgießen unter den zuvor ermittelten Spritzgießparametern. Die graue Kurve veranschaulicht die Temperatur an der nicht temperierten Werkzeughälfte. Die Temperatur erfährt innerhalb eines Zeitraums von 21 Sekunden eine Steigerung von 25 °C auf 35 °C. Im Anschluss erfolgt eine lineare Abnahme der Temperatur. Demgegenüber steigt die Temperatur auf der kalten Seite des Peltier-Moduls auf 55 °C an und fällt im Anschluss langsam ab. Die Möglichkeit, dass der beobachtete Verlauf auf die Wärmespeicherung des Epoxidharzes zurückzuführen ist, kann nicht ausgeschlossen werden. Demgegenüber zeigt die Temperatur auf der heißen Seite des Peltier-Moduls lediglich eine moderate Steigerung. Im zeitlichen Verlauf der Temperatur ist ein Ausfall des Peltier-Moduls festzustellen. Die Abnahme der Temperatur lässt auf eine Unterbrechung des Wärmepumpeneffekts schließen. Im Anschluss stellt sich eine annähernd lineare Erwärmung ein, die auf die Wärmeleitung im Werkzeug zurückzuführen ist.

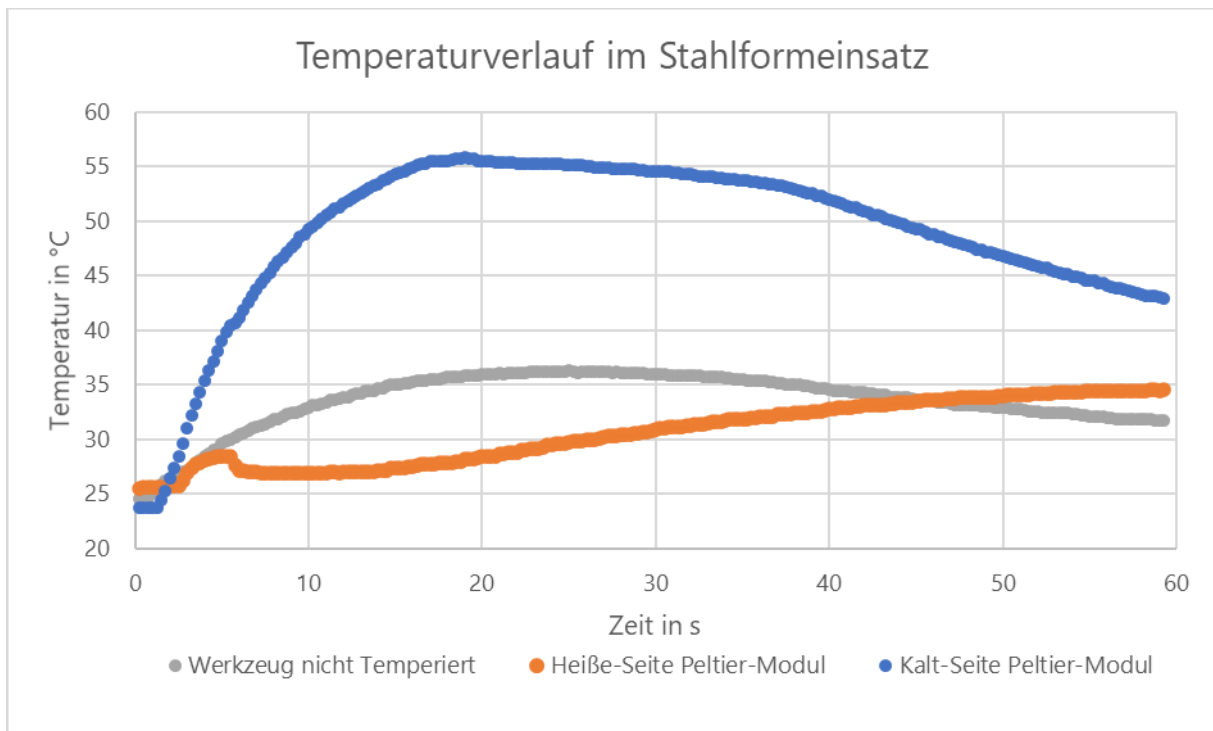
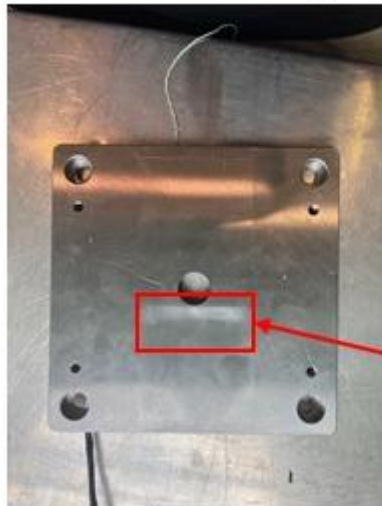


Abbildung 26: Temperaturverlauf des Stahleinsatzes im Spritzgießzyklus

Der Ausfall ist auf einen zu hohen Nachdruck im Werkzeug von 600 bar zurückzuführen, welcher gemäß Abbildung 27 die Kavität nach innen gedrückt hat. Die Materialstärke von 2 mm erweist sich demgegenüber als unzureichend, um die erforderliche Steifigkeit zu gewährleisten. Trotz des Schleifens der Oberfläche ergibt sich nach dem Eingießen des Peltier-Moduls mit Epoxidharz eine nicht planare Fläche. Dieser Prozess resultiert in einer Verformung des Formeinsatzes in Richtung des Inneren. Die rechte Seite veranschaulicht die Überspritzung des Bauteils, welche durch überhöhte Drücke bedingt sind und den Nachdruck zurückzuführen sind.

Rückseite Formeinsatz Angusseite



Überspritzung
Einfallstelle Werkzeug

Ergebnis Formteil

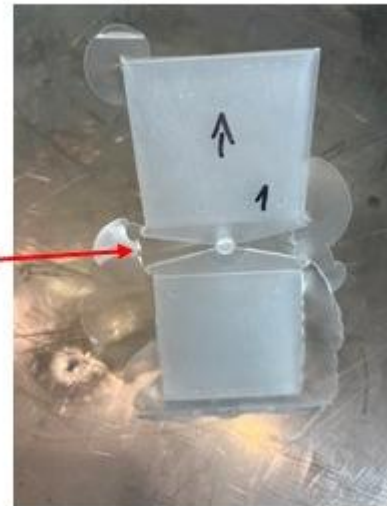


Abbildung 27: Verformung des Formeinsatz an der Angusseite durch Überdruck

Im zweiten Teil des Vorversuches werden die Formeinsätze aus Rigid 10K untersucht die in Abbildung 28. Die Montage der Formeinsätze aus Rigid 10K erfolgt in gleicher Weise wie die der Stahleinsätze im Trägerwerkzeug. Zur Optimierung der Kraftverteilung auf die Fläche wird ein größeres Peltier-Modul verwendet, welches ebenfalls mit Epoxidharz an der additiven Form eingebracht wird.

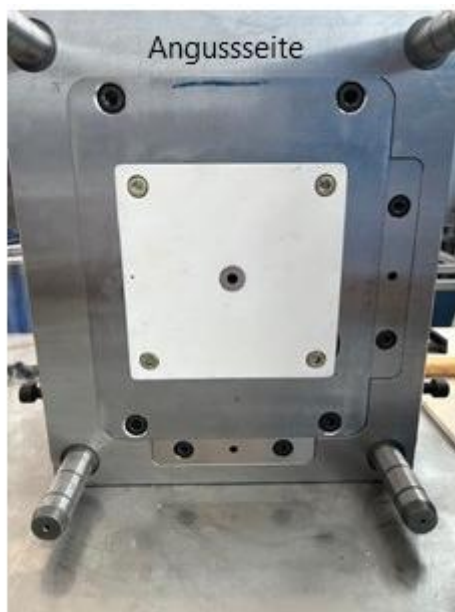


Abbildung 28: Additive Formeinsatz aus Rigid 10K

Das Thermogramm in Abbildung 29 der Funktionsuntersuchung bei Raumtemperatur zeigt das eine Kühlung bei 0,8 V der Oberfläche der Kavität um 2,3 K möglich ist.

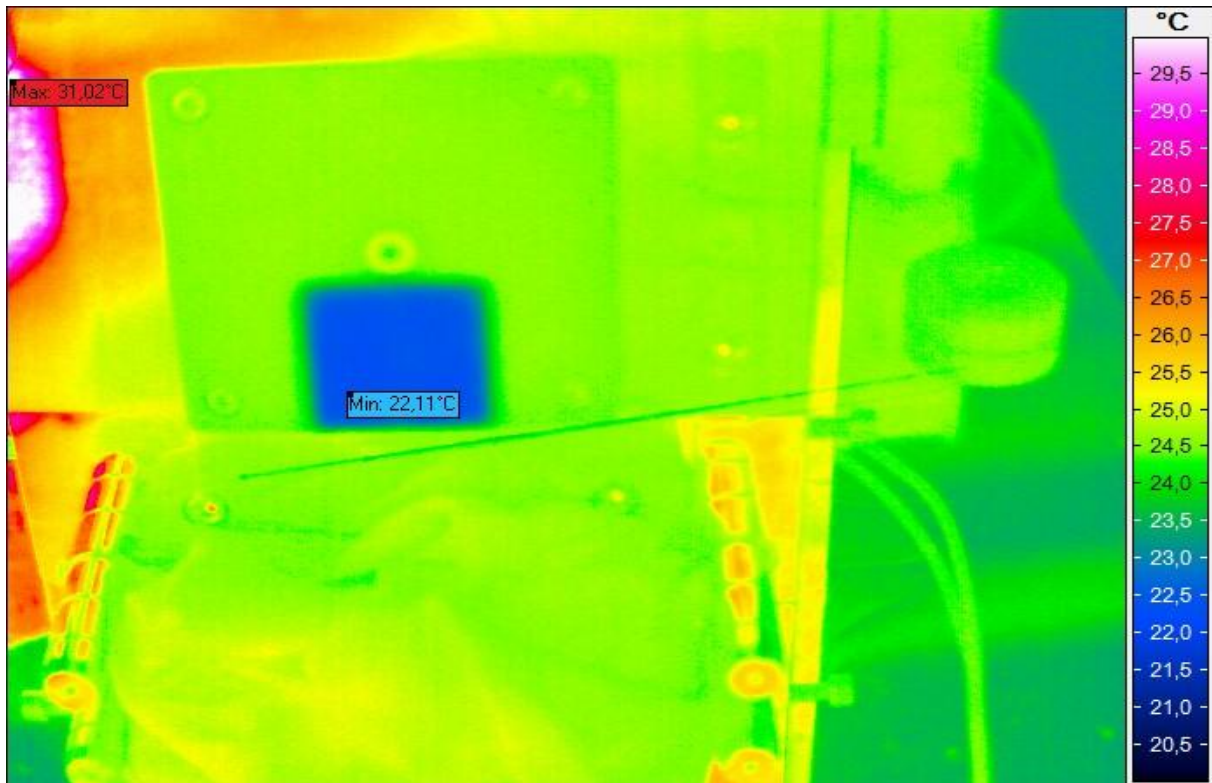


Abbildung 29: Thermogramm des Formeinsatzes aus Rigid 10K

Der Temperaturverlauf in Abhängigkeit der Spannung ist in Abbildung 30 dargestellt. Die graue Kurve zeigt den Verlauf der Temperatur des Werkzeuges auf der nicht temperierten Seite der Formplatte. Die Kurve verläuft annähernd konstant bei einer Temperatur von 24,5 °C. Die blaue Kurve veranschaulicht den Verlauf der kalten Seite des Peltier-Moduls. Die Messung ergab, dass die Kurve bis zu einer Spannung von 1,6 V linear abfällt. Ab einer Spannung von 1,7 V werden keine niedrigeren Kühltemperaturen mehr erreicht. Die orange Kurve veranschaulicht die Temperaturentwicklung auf der heißen Seite des Peltier-Moduls und zeigt ein quadratisches Wachstum der Temperatur.

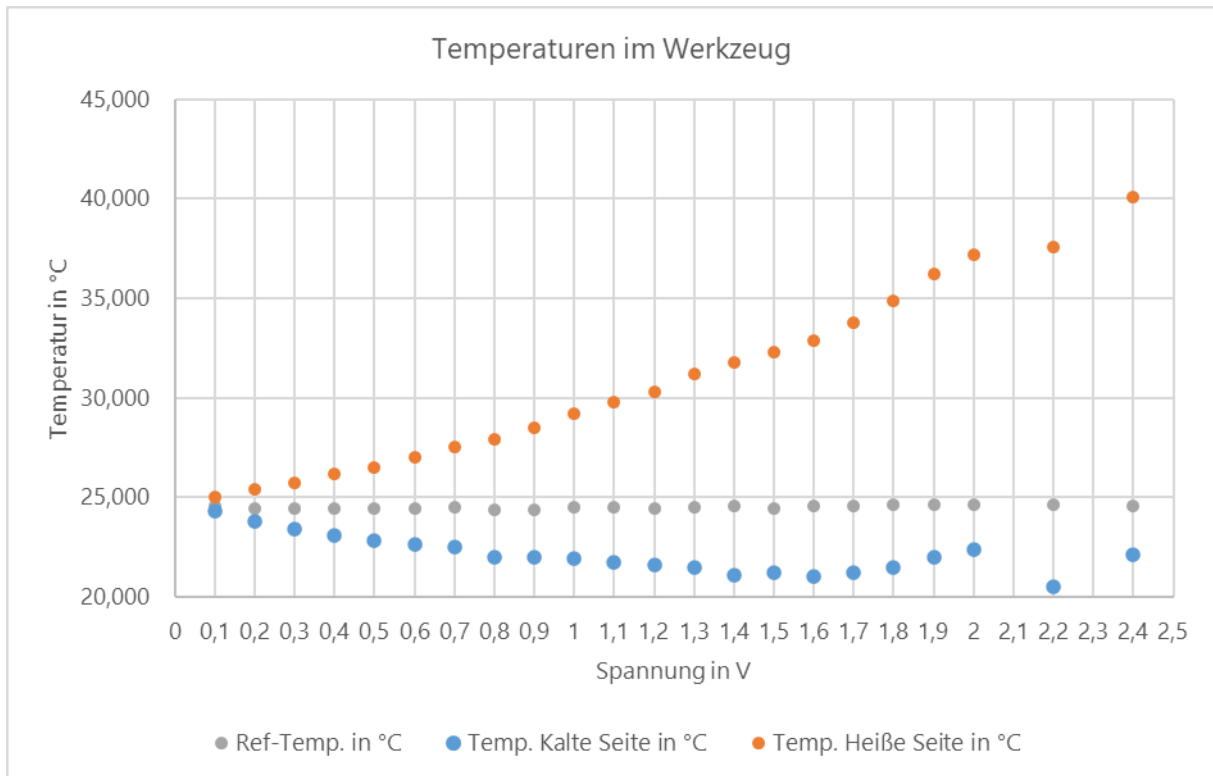


Abbildung 30: Erzielbare Temperaturen des Peltier-Moduls

Im Anschluss erfolgt die Montage und Einrichtung des Werkzeugs auf der Spritzgießmaschine. Während der Einrichtung des Werkzeugs kann bei der Einstellung der Schließkraft auf die geforderten 400 kN ein Knacken bei 60 kN wahrgenommen werden. Hierzu erfolgte das Stoppen des Einrichtens des Werkzeuges und die Untersuchung des Peltier-Moduls. Die Messung der Spannung ergibt das im Peltier-Modul kein Stromflusses vorliegt die auf eine Unterbrechung im Modul zurückzuführen ist. Dies lässt darauf schließen, dass ab diesem Zeitpunkt keine Temperierung in der Kavität mehr möglich ist. Im Anschluss werden weitere Versuche fortgesetzt, um die möglichen Grenzen der Schließkraft bei einem Einspritzdruck von 300 bar zu ermitteln. In diesem Experiment wurde die Schließkraft sukzessive auf 100 kN, 150 kN, 200 kN und 400 kN gesteigert, bis ein Einspritzen unter den vorgegebenen Druckbedingungen möglich ist. Bei einer Schließkraft von 400 kN konnte der Einspritzdruck aufgebracht werden. Nach zwei Zyklen kam es zum Versagen der Form und zum Einbruch des Peltier-Moduls in den Formeinsatz der Angussseite. Die Resultate der Parameterfindung sind in Abbildung 31 dargestellt. Der Versuch zeigt, dass eine optimale Formfüllung des additiven Kunststoffformeinsatzes möglich ist. Das letzte Teil zeigt eine Überspritzung des Bauteils, die durch das Versagen des Formeinsatzes im temperierten Bereich bedingt ist.

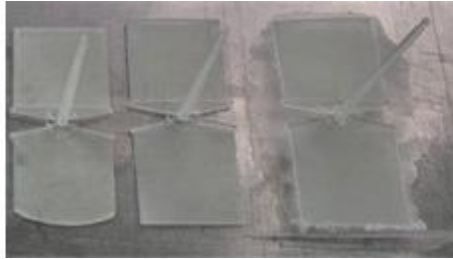


Abbildung 31: Füllstudie des additiv gefertigten Plattenwerkzeugs

In Abbildung 32 ist der Formeinsatz zu sehen. Er zeigt am Bereich der Integration des Peltier-Modules einen quadratischen Einbruch der Werkzeugoberfläche. Dieses Schadensbild deutet daraufhin, dass die Halbleiter im Peltier-Modul versagt haben und die Form nachgegeben hat. Zur Analyse der zugrundeliegenden Ursache wurde der betreffende Bereich im Werkzeug unter Zuhilfenahme eines Röntgengeräts untersucht. Die Analyse ergab, dass das Eindringen von Harz in die Hohlräume, in denen sich Luft einlagern kann, nicht möglich ist. Das Aufbringen der Schließkraft mit einem Überstand des Werkzeuges von 0,01 mm hat das Versagen der Halbleiter-Säulen des Peltier-Moduls zur Folge. Die Auswertung der Röntgenaufnahme lässt den Schluss zu, dass die Ursache des Versagens in einer Überschreitung der Druckfestigkeit oder induzierten Scherspannungen zu suchen ist. Die Beschädigungen der Angussseite sind so stark, dass weitere Versuche nicht möglich sind

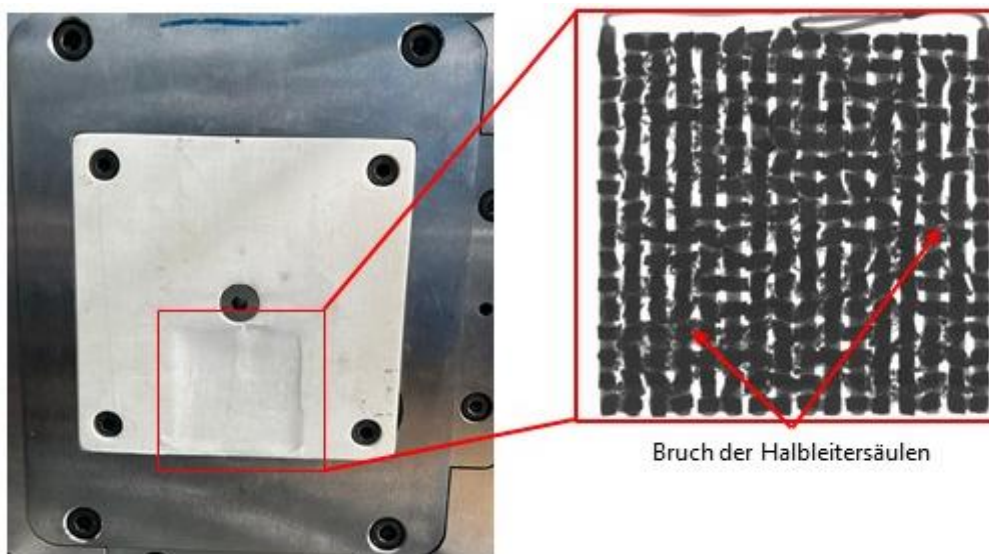


Abbildung 32: Beschädigung des Peltier-Moduls im Formeinsatz aus Rigid 10K

7 Adaptive Peltier-Kühlung im Spritzgießprozess

7.1 Herstellung der Formeinsätze

Die Untersuchung der additiven Formwerkzeuge soll vergleichend an einem Formeinsatz aus Stahl und zwei additiven Kunststoffformeinsätzen erfolgen. Die Fertigung des Formeinsatzes aus Stahl erfolgt unter Verwendung des Materials C45 auf einer Hermle C30 U Dynamic 5-Achsfräse. Abbildung 33 zeigt den subtraktiv hergestellten Formeinsatz.



Abbildung 33: Fließspiralen Formeinsatz

Die Anfertigung des Formeinsatzes aus dem duroplastischen Kunststoff Rigid 10K erfolgt auf einem Formlabs 3. Die Positionierung des Formeinsatzes erfolgt gemäß Abbildung 34 im Slicer Preform auf der Bauplattform. Aufgrund der limitierten Druckfläche des Formlabs 3 ist es nicht möglich, das Bauteil auf der Bauplattform in einer ebenen Position zu drucken. Stattdessen ist der Druck in der dargestellten Positionierung durchzuführen. Die Generierung der Stützstrukturen zur Abstützung von Überhängen erfolgt automatisch im Slicer. Im Rahmen des Prozesses werden Stützstrukturen aus dem Inneren der Spirale entfernt, da diese die Oberflächenqualität verschlechtern und so den Fluss der Schmelze stören würden. Die Entfernung der Stützstrukturen aus dem Inneren der Spirale des Bauteils resultiert in einer roten Färbung der kritischen Bereiche im Slicer.

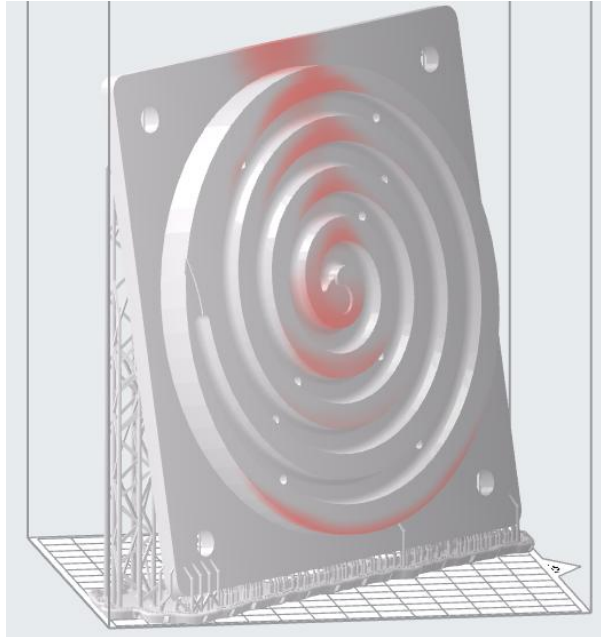


Abbildung 34: Positionierung des Formeinsatzes in Preform

Die Schichtdicke des Werkstoffs werden seitens des Herstellers auf 0,05 mm festgelegt. Das Modell wird in 3231 Schichten geschnitten. Für die Fertigung des Bauteils wird eine Menge von 270 ml Rigid 10K Resin benötigt. Im Anschluss wird das Bauteil von der Bauplattform mit Stützstrukturen getrennt. In diesem Fall ist es von signifikanter Relevanz, die Stützstrukturen am Bauteil zu belassen, da sonst in der Curing-Station Version 1 aufgrund des eingeschränkten Platzangebots eine gleichmäßige Nachhärtung nicht gewährleistet werden kann. Die Parameter für das Curing werden auf 70 °C für 60 min festgelegt. Im Anschluss werden die Stützstrukturen entfernt.



Abbildung 35: Fließspirale aus RIGID 10K

Der Formeinsatz aus Rigid 10 K ist in Abbildung 35 dargestellt. Der zweite additive Formeinsatz, wird aus Duroplast VisiJet-HT-250 nach dem PJP-Verfahren auf einem ProJet 2500+ der Firma 3D-Concepts hergestellt. Die Ausrichtung des Formeinlegers erfolgt im Slicer 3D Sprint und ist in Abbildung 36 dargestellt. Der Aufbau der Form erfolgt in der X-Y-Ebene mit einer Schichtdicke von 32 μm (Ultra High Definition). Die gewählte Ausrichtung ermöglicht eine präzise Fertigung der Fließ-Spirale mit der geringsten Rauheit und Ebenheit. Die Fixierung der Bauteile an der Bauplattform wird durch das Aufbringen von Paraffin als Stützmaterial realisiert.

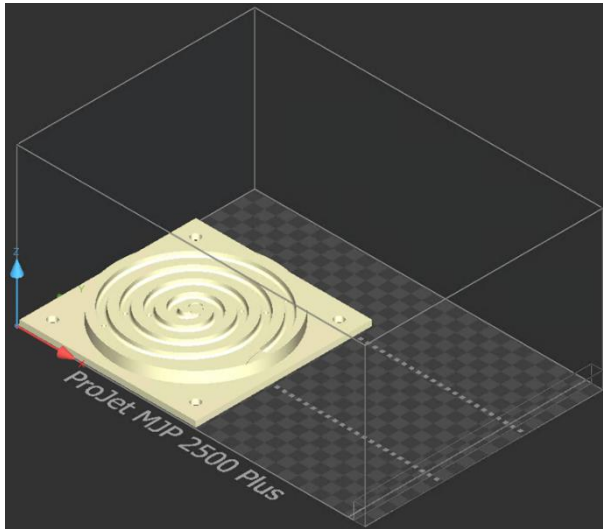


Abbildung 36: Positionierung auf dem MJP-Drucker



Abbildung 37: Fließspirale aus Visijet HT250

Im Anschluss an den Herstellungsprozess werden die Bauteile auf einer Temperatur von 60 °C erhitzt, um das Paraffin abzulösen. Die Entfernung der übrigen Paraffinreste auf den Bauteilen wird in einem Paraffinölbad bei einer Temperatur von 40 °C für 30 min durchgeführt. Im Anschluss werden die Bauteile mittels Druckluft und Isopropanol vom Paraffinöl gereinigt und getrocknet. Der Formeinsatz, gefertigt aus dem Material VisiJet-HT-250, ist in Abbildung 37 dargestellt.

Im Anschluss an die Herstellung werden die Bauteile mit dem Zeiss Atos Q gemessen, um ihre Geometrie mit dem ursprünglichen zum CAD-Modell zu vergleichen. Die Ergebnisse des Flächenvergleichs sind Abbildung 38 zu sehen. Die geringsten Abweichungen zum CAD-Modell weist der subtraktive hergestellte Stahlformeinsatz mit Abweichungen bis 0,08 mm auf. Die größten Abweichungen sind bei dem Formeinsätzen aus VisiJet-HT-250 zu erkennen. Der Formeinsatz ist an der Außenseite nach oben gewölbt und im Zentrum deutlich vertieft. Die Formabweichung kann auf den Herstellungsprozess zurückgeführt werden, da während der Herstellung der Druckkopf im PJP-Verfahren in zwei Druckbahnen druckt. Des Weiteren führt der Unterschied der

dünnen und dicken Bereiche zu induzierten Spannungen während des Aushärtens und Ausschmelzens. Die Summe dieser Effekte führt zum Aufwölben der Form.

Das Messergebnis auf der rechten Seite zeigt die Aufnahme des Formeinsatzes aus Rigid 10K. Die Messdaten zeigen, dass an der rechten Seite ein Bereich mit deutlich positiven Abweichungen zu finden ist. Diese ist auf die Ausrichtung im Slicing zurückzuführen (siehe Abbildung 34), da an dieser Stelle die Stützstruktur angebracht wurde. Ebenfalls führen die nicht abgestützten Bereiche beim Slicing (in Abbildung 34 rot dargestellt) zu einer positiven Abweichung in der Form. In der Mitte der Form ist eine geringe Durchbiegung der Formplatte zu beobachten.

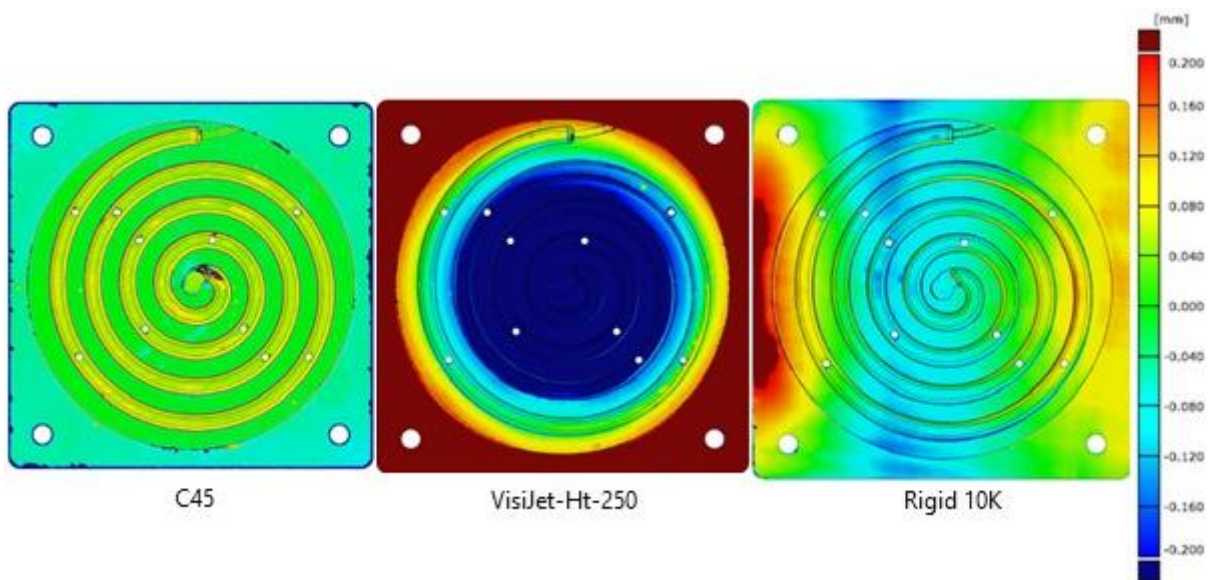


Abbildung 38: Geometrievergleich der Formplatten nach der Herstellung

Im letzten Schritt werden die Bohrungen der Auswerferstifte mit einem Messstiftsatz hinsichtlich ihres Bohrungsdurchmessers von 3 H7 mm untersucht. Es zeigt sich, dass die Bohrungen bei der Formplatte aus Stahl C45 und VisiJet-HT-250 mit einem Durchmesser von 2,95 mm nur geringe Abweichungen aufweisen. Im Gegensatz dazu wiesen die Bohrungen in der Rigid 10K Formplatte ein Maß von 2,65 mm auf. Diese starke Abweichung ist darauf zurückzuführen, dass während des Druckvorgangs Reste von Resin in den Bohrungen verblieben sind, die nach dem Waschen nicht vollständig entfernt wurden. Ursachen hierfür sind die Verfestigung des Resins während des Drucks, Kapillarkwirkungen sowie das unzureichende Auswaschen aus der Form. Die Abweichungen in den Formplatten werden im Anschluss auf 3 mm aufgebohrt und mit einer Reibahle auf die Passung H7 nachgearbeitet.

7.2 Entwicklung der adaptiven Peltier-Kühlung

Die Erforschung eines adaptiven Peltier-Moduls erfolgt unter Berücksichtigung des grundlegenden Aufbaus eines Peltier-Elementes, wie in Kapitel 2.3 beschrieben, sowie unter Berücksichtigung der Erfahrungen aus dem Vorversuch in Kapitel 6. Diesbezüglich soll der Zwischenraum zwischen den Halbleiterelementen gefüllt werden, um die Steifigkeit des Peltier-Elementes zu steigern. Das Ziel des adaptiven Peltier-Moduls besteht darin, der Geometrie der Fließspirale aus Kapitel 4.1 zu folgen, um somit eine gezielte Abführung von Wärme zu ermöglichen. Die Anordnung der Elemente entlang der Geometrie erfolgt auf Basis der abzuführenden Wärmemenge ($\dot{Q}_C$) und der zur Abführung benötigten Anzahl von 230 Peltier-Elementen (siehe Kapitel 4.3.4). In der ersten Iteration, wie in Abbildung 39 links dargestellt, erfolgt die Anordnung gemäß dem typischen Vorgehen in herkömmlichen Peltier-Moduls. Diese Vorgehensweise gestattet ein inadäquates Folgen der gelben Kontur durch die Thermopaare. Die klassische Anordnung resultiert in einer geringeren Abdeckung der Kontur und folglich in einem geringeren Abtransport von Wärme von der Wärmequelle.

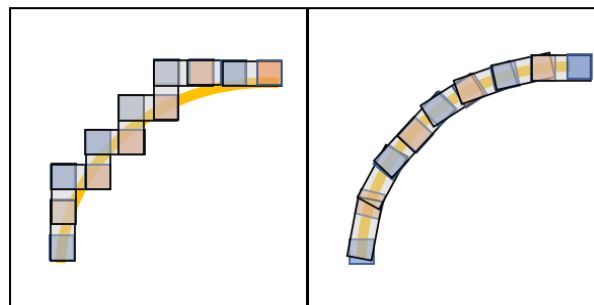


Abbildung 39: Anordnung Peltier-Elemente im klassischen und adaptiven Design

Eine alternative Anordnung der Thermoelemente ist in Abbildung 39 auf der rechten Seite dargestellt. Die Rotation einzelner Halbleiterblöcke sowie der Kupferbrücken erlaubt die Adaption der Bogenkontur. Die vorliegende Methode weist folgende Nachteile auf: Die Kontaktfläche, an der der Peltier-Effekt wirkt, wird verkleinert und für die Positionierung benötigt eines der Bauteile eine komplexe Positionierungsgeometrie. Die Aufteilung des Peltier-Moduls in fünf Teilelemente (siehe Abbildung 40) wird vorgenommen, um den Schichtaufbau des adaptiven Peltier-Element zu ermöglichen. Das erste und fünfte Bauteil besteht aus einer dünnen Schutzfolie, die dazu dient, den Peltier-Modul vor dem Kurzschluss zu schützen. Das Element 2 und das Element 4 definieren die Lage und Ausrichtung der Kupferverbindungen. Das Element 2 wird durch zwei Zylinder in eine bestimmte Montageposition gebracht. Das dritte Element erfüllt die Funktion eines Trägers für die Halbleiter und sorgt für deren Positionierung entsprechend der Form. Die Anordnung der Thermoelemente erfolgt entlang der Mittellinie der Schnecke. Gemäß Kapitel 4.3.4

ergibt sich eine Berechnung, die die Verwendung von 230 Thermoelementen für einen Stahlformeinsatz nahelegt. Allerdings limitieren geometrische Faktoren die Anzahl der unter einer Reihenschaltung auf der Spirale platzierbaren Paare auf 105.

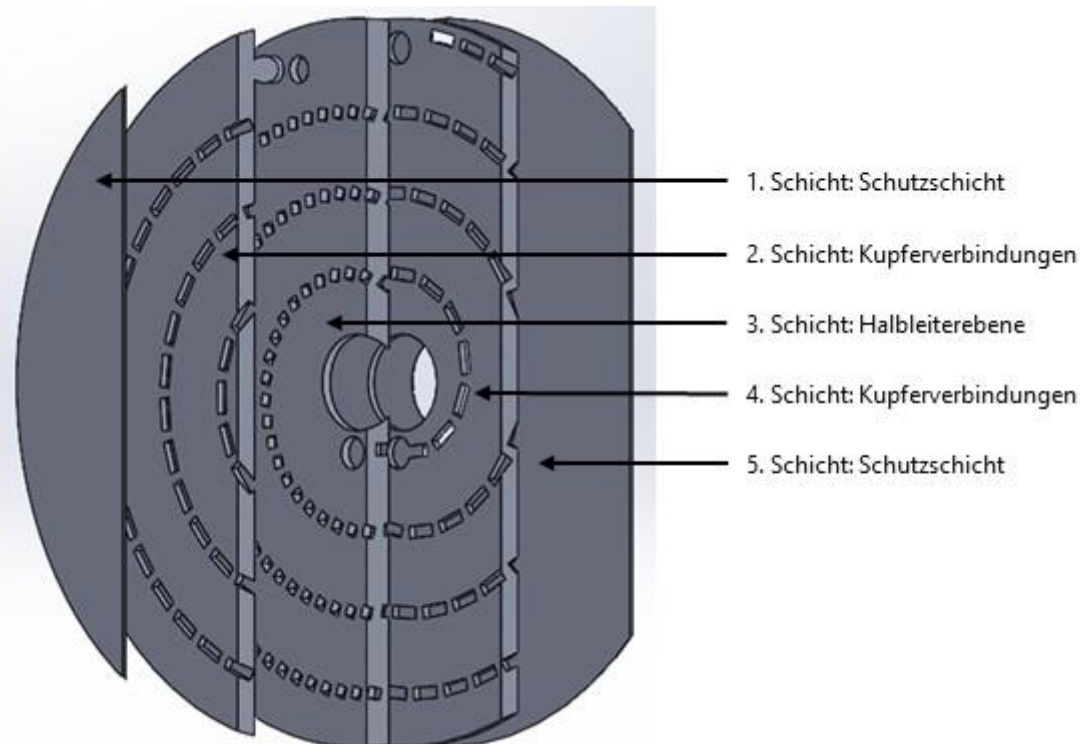


Abbildung 40: Explosionsansicht adaptive Peltier-Temperierung

Die Schichten des adaptiven Peltier-Moduls werden im Fused-Layer-Modeling-Verfahren aus PLA-Filament hergestellt. Als Drucker kommt ein Prusa XL mit einer Schichtdicke von 0,15 mm zum Einsatz. Für dieses Verfahren wurde sich entschieden, da es die Verarbeitung von Thermoplasten ermöglicht, die eine höhere Verformbarkeit aufweisen als Duroplaste. Zudem lassen sich mit diesem Verfahren eine hohe Maßhaltigkeit, eine gute Geometrie-treue sowie geringe Verzugsneigung erreichen.

Im ersten Schritt des Montageprozesses wurden die thermoelektrischen Halbleiterelemente in die mittlere Ebene des Temperiersystems integriert. Die Halbleiterelemente haben eine Größe von 2,2 mm in der Länge, 2,2 mm in der Breite und 1,7 mm in der Höhe. Im darauffolgenden Schritt erfolgt die Montage der Brücken aus Kupfer auf einer ebenen Platte, welche sich in der oberen Ebene des Bauteils befindet. Vor dem Einbringen wird in den Zwischenraum die Lotpaste Voltera T5 (Sn63Pb37) appliziert. Im darauffolgenden Schritt werden die oberen Kupferbrücken unter Anwendung eines ähnlichen Vorgehens mit den Halbleitern verbunden. Die Erwärmung der Brücken resultiert in deren Verlöten mit den Halbleiterelementen. Im finalen Schritt werden an den Enden des Temperaturregelsystems zwei Kabel mit einem Querschnitt von 1,25 mm² angelötet.

Zur Prävention eines Kurzschlusses werden die Kabel mit einem und die Epoxid-Harz verklebt und die Zwischenräume im Leiterelement versiegelt. Die in Abbildung 41 dargestellte Konfiguration werden unter Verwendung eines Voltmeters überprüft, um den Stromfluss zwischen den einzelnen Elementen sicherzustellen. Der gesamte Widerstand der integrierten Peltier-Elemente beträgt 30 Ohm.

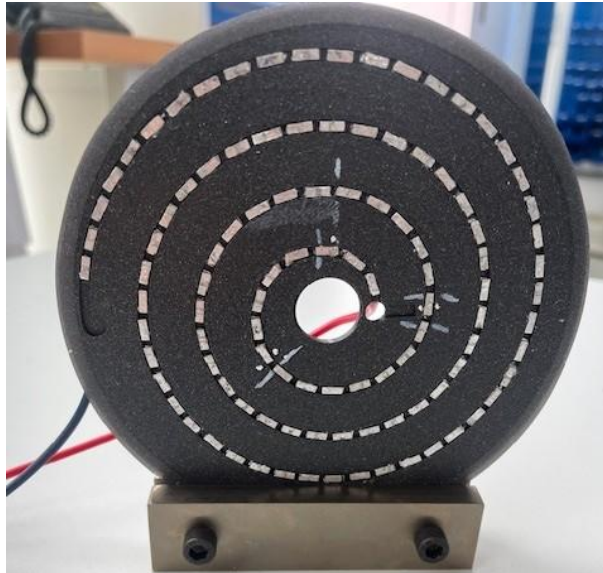


Abbildung 41: Adaptives Temperierungselement

Zur Verifizierung der Funktionsweise des adaptiven Peltier-Module wurde dieses in einen experimentellen Versuchsaufbau integriert, wie in Abbildung 42 dargestellt. Das Peltier-Element wird mit einer regelbaren Spannungsquelle verbunden und gemäß dem in Kapitel 6.3 beschriebenen Konzept für die Temperaturmessung ausgestattet.

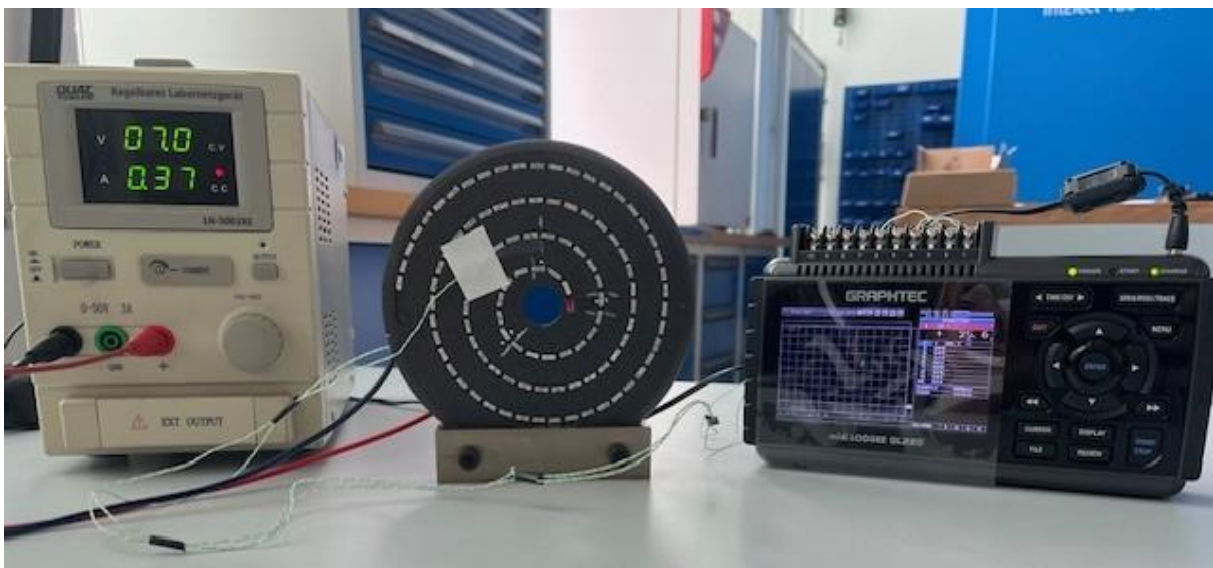


Abbildung 42: Prüfstand zur Funktionsweise der Peltier-Temperierung

Zur Erfassung einer flächendeckenden Temperaturverteilung wird eine Thermokamera des Herstellers Fluke eingesetzt. Die Untersuchungen des adaptiven Peltier-Moduls

wurden unter Raumbedingungen bei einer Anfangstemperatur von 24 °C durchgeführt, wobei auf das Anbringen einer Wärmequelle und Wärmesenke an die Peltier-Kühlung verzichtet wird.

Die Wärmebildaufnahmen der heißen und kalten Seite des Peltier-Moduls sind in Abbildung 43 und Abbildung 44 unter einer Stromstärke von 1,4 A dargestellt.

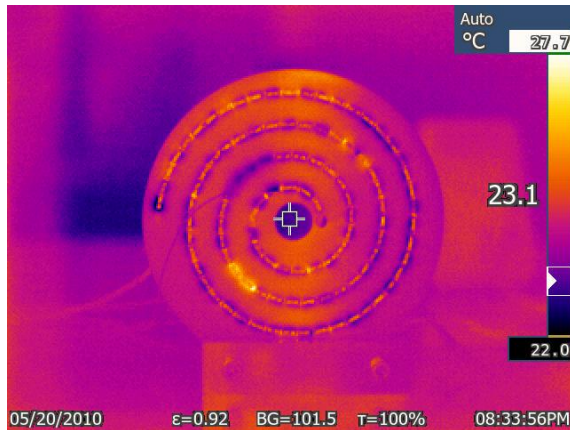


Abbildung 43: kalte Seite des adaptiven Peltier-Moduls

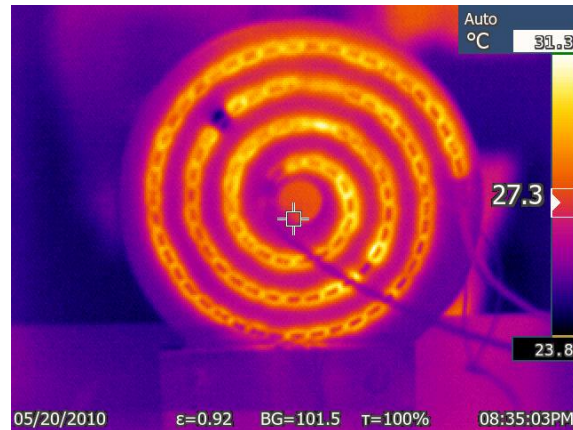


Abbildung 44: warme Seite des Peltier-Moduls

Es konnte festgestellt werden, dass der Stromfluss zu einer Temperaturdifferenz zwischen den beiden Außenseiten des Peltier-Moduls führt. Zudem konnte der Wärmetransport des Peltier-Moduls beobachtet werden. Die Temperatur der kalten Seite weist im Vergleich zur Temperatur der umgebenden Trägerstruktur eine deutlich geringere Temperatur auf. Die nicht flächige Verteilung der Kühlflächen ist auf die nicht homogene Kontaktierung der thermoelektrischen Elemente zurückzuführen. Der Peltier-Effekt manifestiert sich ausschließlich an den Kontaktflächen des Halbleiters, was zu einer verringerten Oberfläche führt. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, dass durch die Positionierung oder das zusätzliche Löten Kunststoff zwischen das Halbleiterelement und die Brücken eintritt. Dies kann den Peltier-Effekt verhindern.

Demgegenüber ist auf der heißen Seite eine zu erwartende Erwärmung der Elemente zu beobachten, die entlang der Geometrie der Fließspirale verläuft. Im linken oberen Bereich der Abbildung ist eine Besonderheit erkennbar, die mit einer erhöhten Kühlung einhergeht. Die Ursache für dieses Phänomen kann in einer fehlerhaften Paarung des thermoelektrischen Elements oder einer unzureichenden Kontaktierung liegen.

Zur detaillierten Analyse des Temperaturverhaltens unter variierenden Stromstärken werden die Messwerte über die beiden Thermoelemente für eine Dauer von 30 Sekunden erfasst. Abbildung 45 veranschaulicht die potenziellen Temperaturdifferenzen zwischen der heißen und kalten Seite des Peltier-Moduls in Abhängigkeit von der Stromstärke. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass gemäß dem Jouleschen Gesetz bei einer

Erhöhung der Stromstärke eine quadratisch ansteigende Erwärmung des Bauteils zu verzeichnen ist.

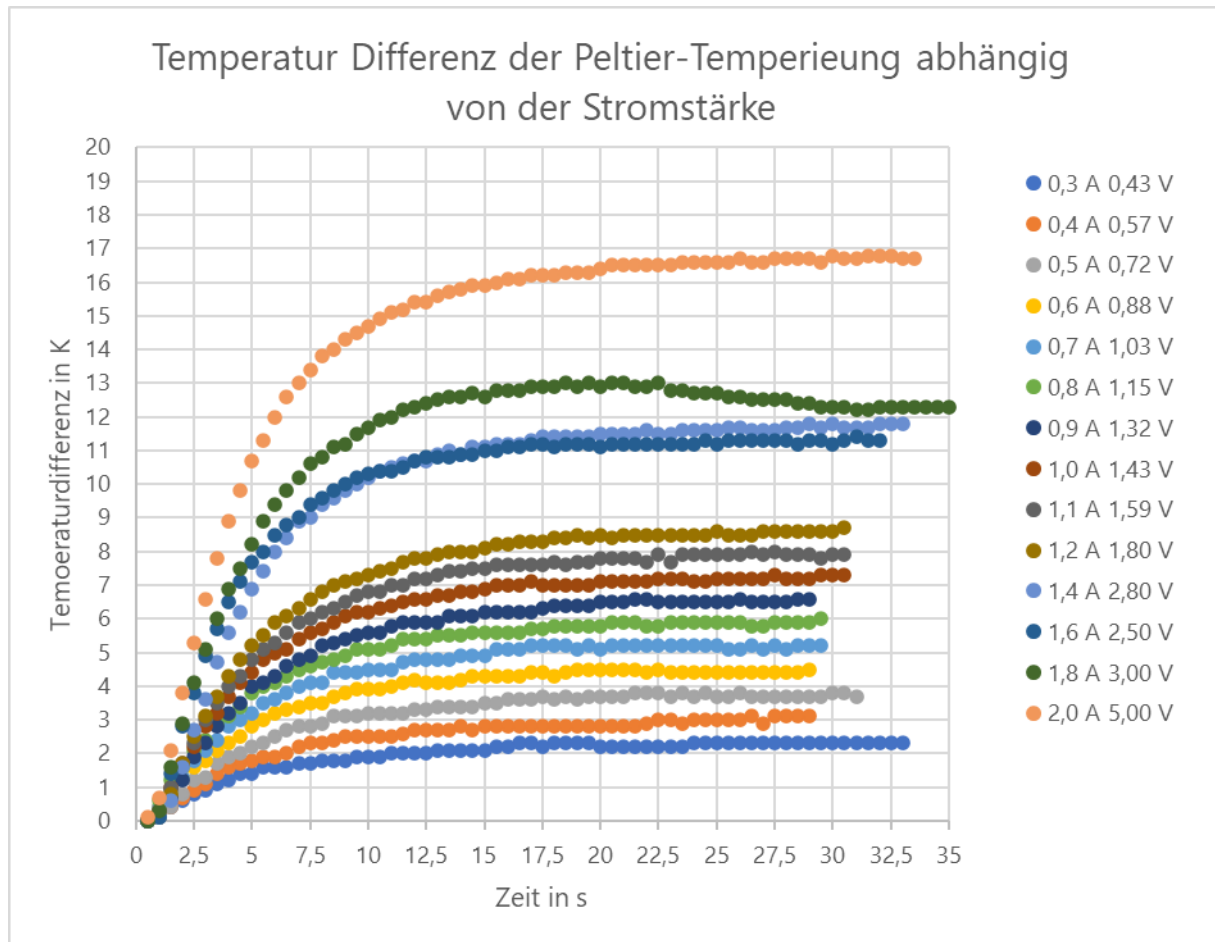


Abbildung 45: Temperaturdifferenz bei unterschiedlichen Stromstärken

Die vorliegenden empirischen Untersuchungen im nicht eingebauten Zustand ergeben, dass das Peltier-Modul dazu befähigt ist, thermische Energie von der Wärmequelle an die Wärmesenke zu übertragen. Die Positionierung von zwei Thermoelementen auf der Wärmequelle und der Wärmesenke ermöglicht die Beobachtung und Aufzeichnung des Pumpeffekts des Thermoelements.

7.3 Montage der Formeinleger im Trägerwerkzeug

Die Montage auf der Auswerferseite erfolgt durch das Einsetzen der Formenleger in die Trägerseite. Daraufhin erfolgt die Montage der Sicherungsplatte. Im darauffolgenden Schritt werden die Auswerferstifte im Werkzeug montiert. Die Montage erfolgt unter Anwendung von Pressung, wodurch eine Sicherung der Auswerfer im Auswerferpaket erfolgt. Zur Erreichung des Ziels, die Auswerferstifte eben in der Kavität zu positionieren, wird das Auswerferpaket durch den Einsatz von Abstandsplatten eingerichtet. Die Abbildung 46 zeigt den montierten additiven Kunststoffformeinleger aus Rigid 10K.



Abbildung 46: Montierter Rigid 10K Formeinatz

Im Rahmen des Montageprozesses der gegenüberliegenden Angussseite wird die Peltier-Temperierung in das Trägerwerkzeug integriert. Zu diesem Zweck werden die für die Stromversorgung und die Temperaturmessung vorgesehenen Leitungen durch die entsprechenden Bohrungen geführt und das Element mittels der Angussbuchse im Inneren montiert. Das montierte Kühlsystem ist in Abbildung 47 dargestellt. Die Ausrichtung zu der gegenüberliegenden Spirale erfolgt durch den Verlauf der Versorgungsleitungen. Es ist von essentieller Bedeutung, die Peltier-Temperierung zu schützen. Zu diesem Zweck wird eine Schutzplatte aus Stahl eingesetzt, die mit dem Formeinatz verschraubt wird. Bei der Installation des Kühlsystems ist äußerste Sorgfalt erforderlich, da innere Spannungen im Kühlsystem dazu führen können, dass sich Lötverbindungen lösen und folglich die Temperierung ausfallen kann. Die abschließende Prüfung des adaptiven Temperiersystems offenbart, dass sich während des Montageprozesses ein Problem mit den Lötverbindungen zeigte, was dazu führte, dass eine Temperierung nicht gewährleistet werden konnte. Aufgrund der aufwendigen Herstellung des

spiralförmigen Temperiersystems wird sich entschieden eine Formträger aus Stahl einzusetzen und die Fließspiralen hinsichtlich ihrer Standzeit zu untersuchen.

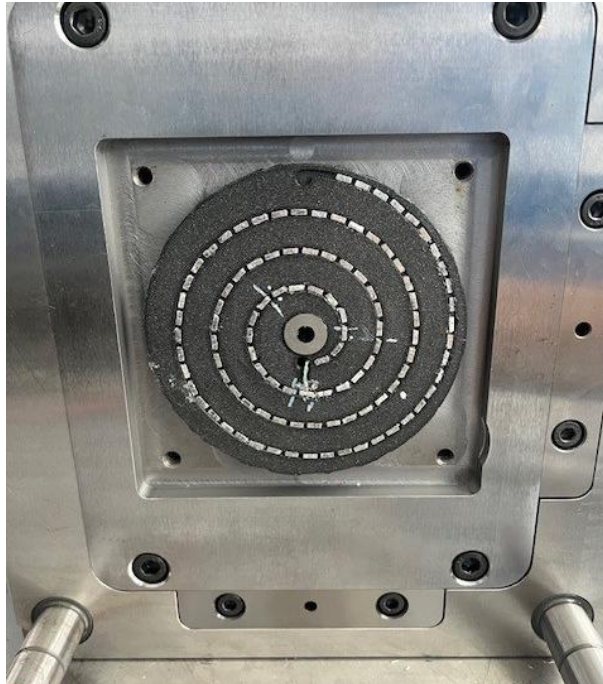


Abbildung 47: Montage des adaptiven Peltier-Temperiersystems

7.4 Untersuchungen im Spritzgießprozess

Zur Validierung der Spritzgießparameter für die Fließspirale wird eine Füllstudie für den Formeinsatz aus Stahl C45 durchgeführt. Die Entformungstemperatur wird auf 70°C festgelegt und die Kühlzeit nach Gerke mit 27,68s berechnet.

Die Parameter werden wie im Vorversuch auf der IntInject 180 der Firma Sumitomo Demag durchgeführt. Als Kunststoff wird der PP Thermoplast von Borealis mit dem Typ Daploy WB140HMS aus Kapitel 6 verwendet. Die Verarbeitungsparameter werden aus dem Versuch übernommen.

Zur Untersuchung der Entformungstemperatur der Fließspirale wird eine Thermalkamera vom Typ „Vario CAM hr head“ der Firma InfraTec GmbH verwendet, die im Schutzbereich installiert wird. Die aufgenommenen Thermogramme sind in Abbildung 48 dargestellt und zeigen die maximale gemessene Temperatur der Fließspiralen nach dem Öffnen des Werkzeuges. Im ersten Bild links ist das Thermobild bei der berechneten Kühlzeit nach Gerke zu sehen. Die gemessene Temperatur im arithmetischen Mittel von 85,5 °C weicht von der festgelegten Entformungstemperatur von 70 °C ab. Die Verdopplung der Kühlzeit führt zur Einhaltung der Entformungstemperatur. Der experimentelle Versuch zeigte das mit einer Kühlzeit von 37,95 s die Fließspirale mit 70 °C entformt werden kann.

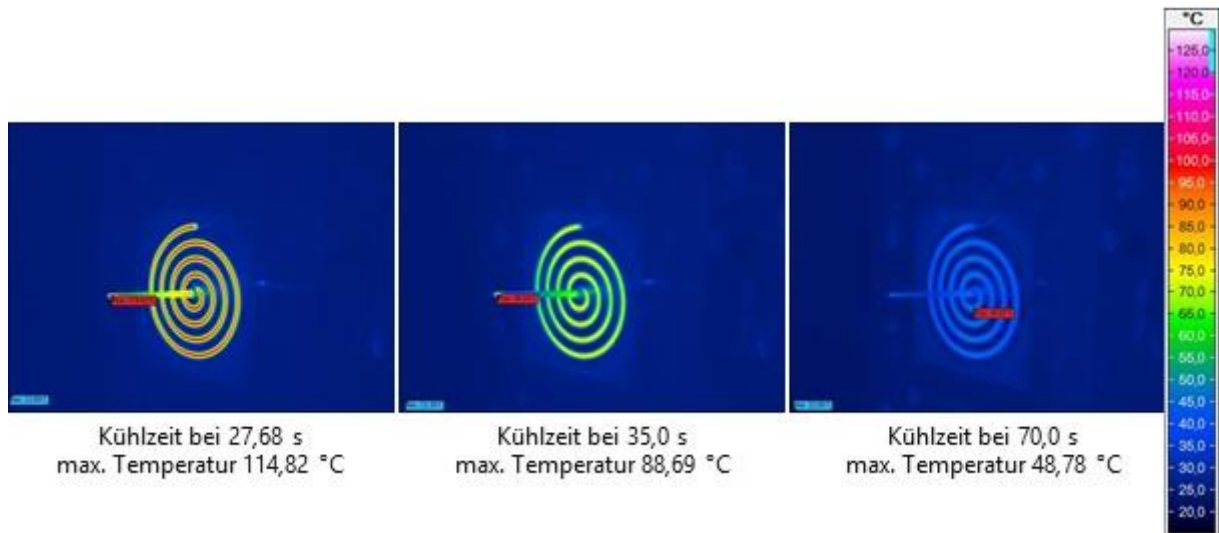


Abbildung 48: Thermogramme Fließspirale nach unterschiedlichen Kühlzeiten

Die maximale Entformungstemperatur der Fließspiralen über die Zyklen ist im Diagramm aus Abbildung 49 dargestellt. Im Diagramm ist zu erkennen, dass die Entformungstemperatur mit längerer Kühlzeit abnimmt. Innerhalb der Versuchsreihen kommt es zu Schwankungen aufgrund der Entformung aus dem Werkzeug.

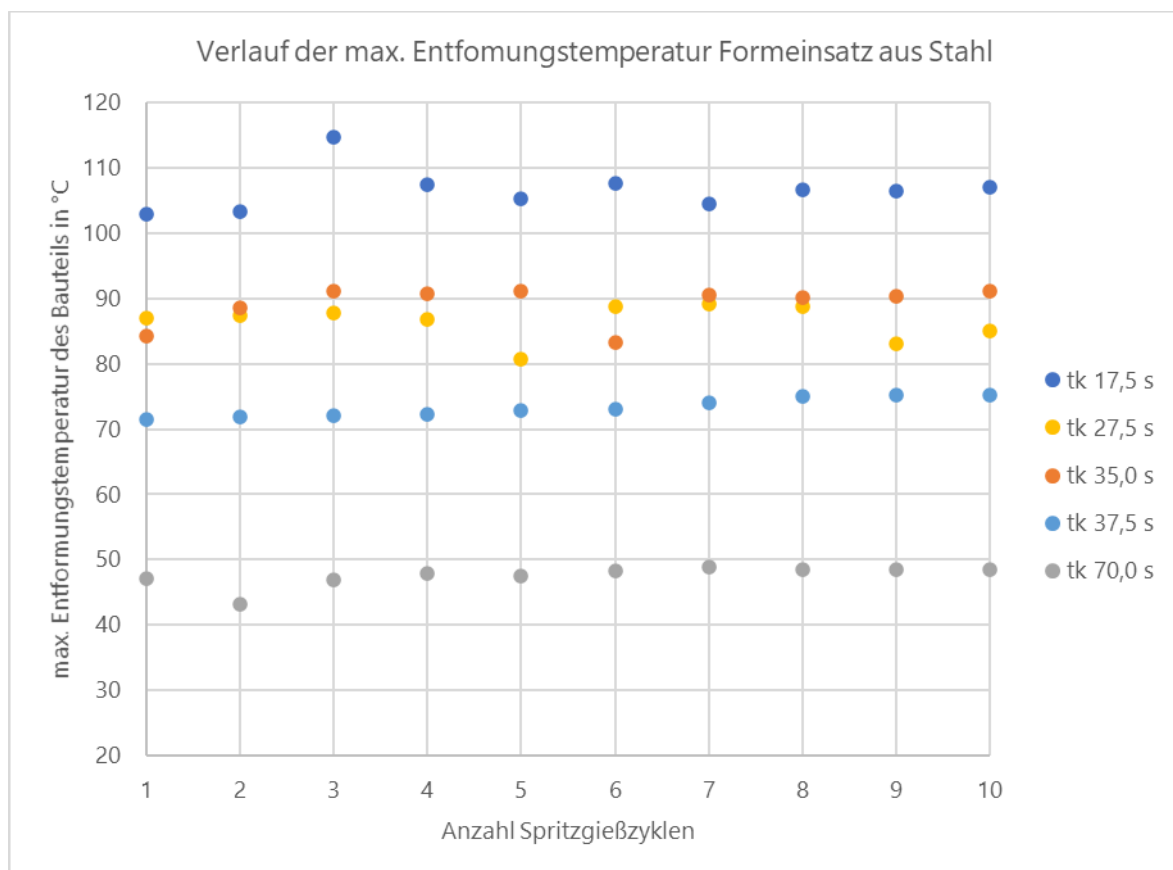


Abbildung 49: maximale Entformungstemperatur über 10 Zyklen

Nach 50 Zyklen erfolgte eine Messung der Geometrie des Formeinsatzes mit dem optischen Koordinatenmessgerät Atos Q. Dazu wird die Formplatte aus dem Werkzeug

ausgebaut und auf einem Drehtisch gescannt. Die Messung der Geometrie ist im Inneren des Werkzeuges nicht möglich, da nicht alle Bereiche durch den Sensor erfasst werden können. Die Ergebnisse der optischen Geometriemessung nach einer Schussanzahl von 50 Stück ist Abbildung 50 dargestellt.

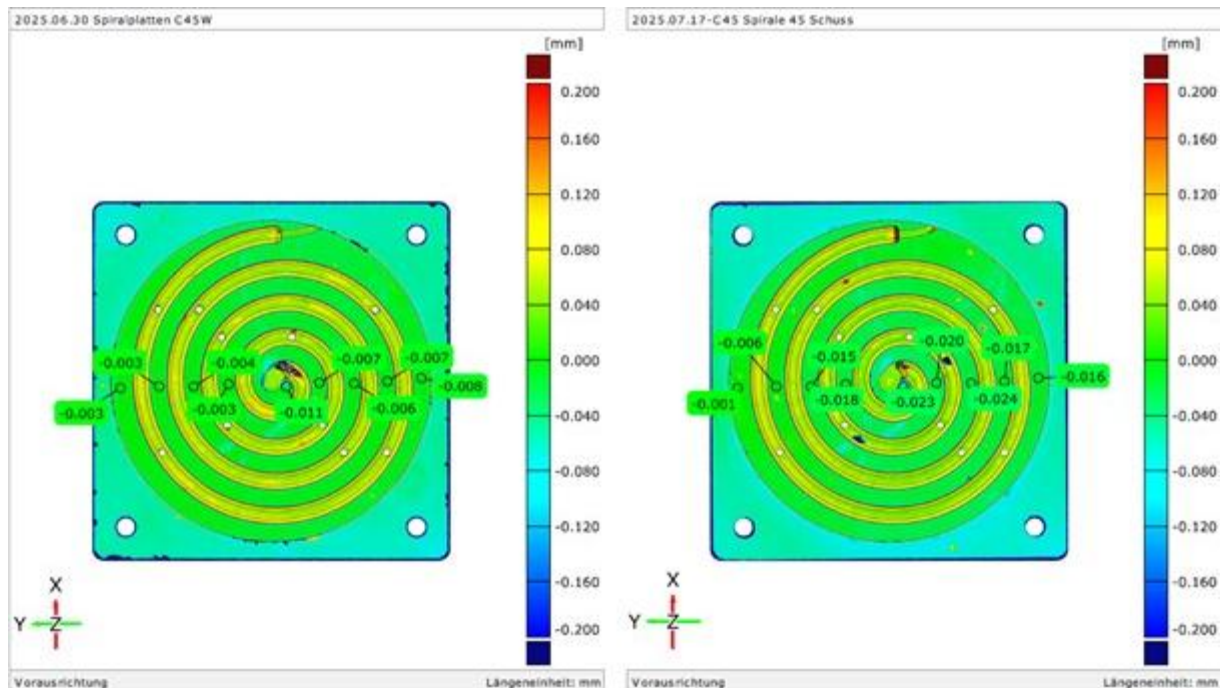


Abbildung 50: Geometrievergleich des Stahl Formeinsatz nach 45 Zyklen

Die Messwerte zeigen, dass an der Form aus Stahl keine signifikanten Veränderungen zu messen sind. Als zweiter Werkstofftyp wird das Material Rigid 10K der Firma Formlabs untersucht. Hierzu erfolgt der Austausch der Formeinsätze auf der Auswerfer- und Angusseite. Die Schließkraft wird auf 400 kN reduziert, um ein Zerquetschen der Form zu verhindern. Die Kühlzeit wird, wie nach Gerke berechnet auf 153 s eingestellt. Der Formeinsatz wird zur Herstellung von insgesamt 40 Fließspiralen eingesetzt. Der Temperaturverlauf der max. Entformungstemperatur zeigt, dass die Fließspirale nach längerer Kühlzeit eine höhere Entformungstemperatur aufweist als bei Stahlwerkzeugen. Die gemessene Temperatur liegt im Mittel näher an der vorgegeben Entformungstemperatur von 70 °C. Weiterhin ist im Diagramm aus Abbildung 51 zu beobachten, dass die Temperatur stärker als bei der Stahlform schwankt.

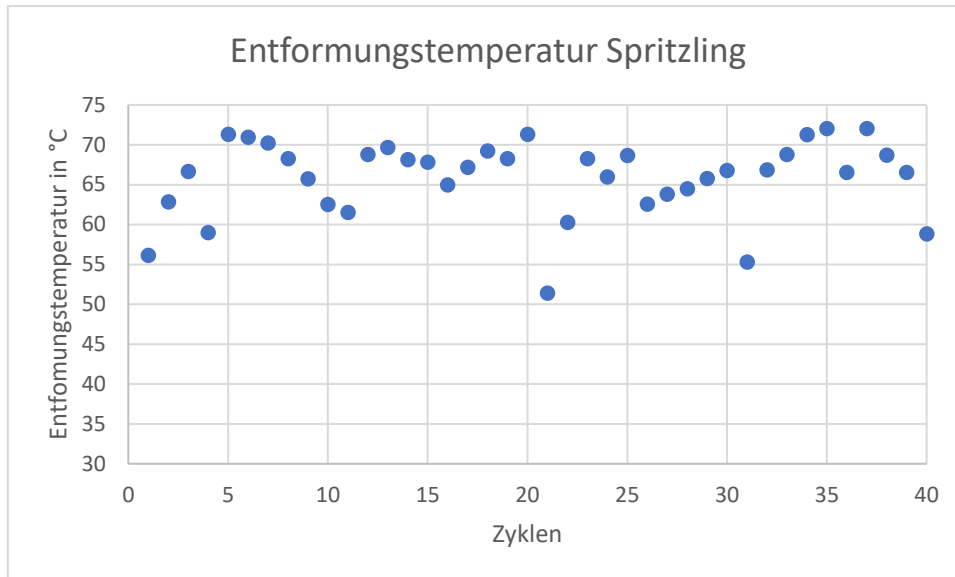


Abbildung 51: Entformungstemperatur aus dem Rigid 10K-Formeinsatzs

In der Abbildung 52 ist die geometrische Veränderung des Formeinsatzs nach 10 und 40 Zyklen dargestellt. Im Bereich des Angusses ist zu erkennen, dass dieser über die Zeit nach innen verformt wird. Im Gegensatz dazu ist zu erkennen das sich im äußeren Bereich die Form aufwölbt. Weiterhin kommt es zur Einebnung der Form an der Außenseite.

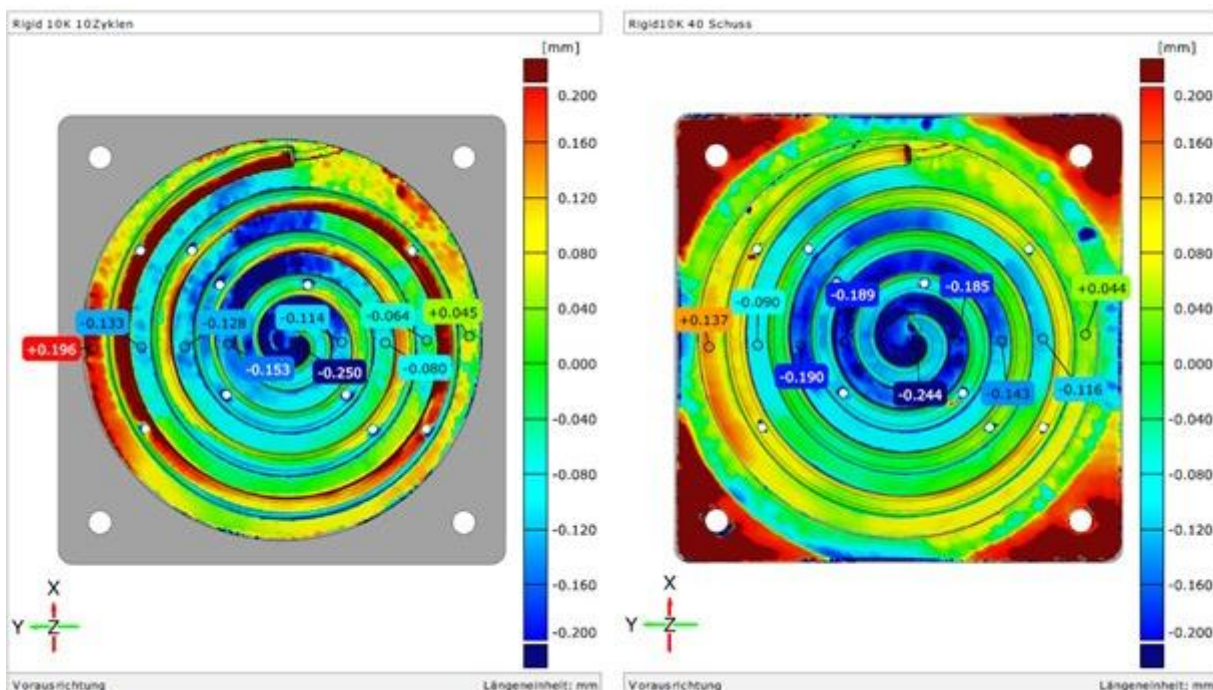


Abbildung 52: Messung der Geometrie nach 10 und 40 Zyklen

Das letzte untersuchte Material ist das VisiJet-HT-250 von der Firma 3D-Systems. Hierzu wird der Formeinsatz auf der Auswerferseite erneut gewechselt. Die Kühlzeit wird wie berechnet auf 136,93 s eingestellt. Während der Montage ist ein Knacken wahrnehmbar, das aus dem Anziehen der Schrauben zur Fixierung der Sicherungsplatte

resultiert. Die Betrachtung des Werkzeuges zeigt, dass sich entlang des Zylinders auf der Formplatte ein Riss gebildet hat. Nach erfolgreicher Prüfung der Auswerferstifte wird die Formplatte zum Spritzgießen verwendet. Das Einspritzen und Abkühlen erfolgt unter ähnlichen Parameter zum Werkzeug aus Rigid10K. Das Auswerfen der Fließspirale führt zum Ausbrechen der zylindrischen Geometrie mit der Kavität aus der Formplatte. Der Teil der Formplatte unterhalb der Sicherungsringes verblieb in der Form. Die Abbildung 53 zeigen das Werkzeug kurz nach dem Auswerfen und die einzelnen Bruchstücke. Aufgrund des Ausbrechens der Kavität aus der Formplatte und somit dem Verlust des Fokus der Thermalkamera kann keine Entformungstemperatur gemessen werden.



Abbildung 53: Schadensbild des Visijet-HT-250 Formeinsatzes

Nach Betrachtung der Abbildung 53 und der Geometriemessung aus Abbildung 38 nach der Herstellung ist der Schaden des Werkzeuges auf die hohe Durchbiegung der Formplatte und die Sprödigkeit des Materials zurückzuführen. Verstärkt wird dies durch die hohe Rauheit in der Kavität. Diese erhöhte Rauheit in der Kavität sind auf die z-Druckrichtung zurückzuführen wodurch sich der Thermoplast in den entstehenden Rillen festsetzt und ein Entformen deutlich erschwert.

Als Ergebnis der Untersuchungen entstehen Fließspiralen wie aus Abbildung 54. Die Fließspiralen sind komplett gefüllt, weisen jedoch Einfallstellen, Blasen und Überspritzungen auf. Die Einfallstellen sind auf einen zu geringen Nachdruck oder den Filman-guss zurückzuführen sind. Die Blasenbildung kann auf eine zu niedrige Schmelztemperatur der Formmasse oder ein zu schnelles Einspritzen der Formmasse hindeuten. Überspritzungen entstehen durch zu hohen Nachdruck oder eine ungenaue Bearbeitung der Passungen um die Angussdüse. Bei fehlerhafter Temperierung können hohe Temperaturen dazu führen, dass die Fließspiralen nicht entformt werden können.



Abbildung 54: Fließspirale mit Fehlern aus PP

8 Diskussion der Ergebnisse der variothermen Prozessführung mit Hilfe eines Peltier-Modules in additiven Formeinsätzen

8.1 Vergleich mit traditionellen Kühl- und Heizmethoden

Die Integration eines adaptiven Kühlsystems auf Basis von Peltier-Modulen in ein Spritzgießwerkzeug ist grundsätzlich realisierbar. Voruntersuchungen und Entwicklungsschritte zeigen jedoch ein erhebliches Optimierungspotenzial, insbesondere hinsichtlich der mechanischen und thermischen Belastbarkeit der Module. Grundlage der Integration bildeten thermische Simulationen und stationäre Berechnungen der Temperaturverteilung im Werkzeug. Die Abschätzung der erforderlichen Kühlleistung orientierte sich am Berechnungsablauf nach Hopmann [2] und erfolgte auf Basis einer stationären Energiebilanz.

Für die Ermittlung der Kühlzeit wurden sowohl die klassische Kühlzeitformel als auch eine von Gerke entwickelte Formel für additive Kunststoffformeinsätze angewendet. Die Ergebnisse aus Kapitel 4.3 zeigen deutlich längere Kühlzeiten für Kunststoffformen im Vergleich zu Stahlformen. Die numerischen Spritzgießsimulationen in Kapitel 4.3.2 bestätigten diesen Befund. Die Diskrepanz zur herkömmlichen Kühlzeitformel nach Hopmann resultiert auf den Restriktionen der Formel. Sie fordert eine hohe Wärmeleitfähigkeit des Materials sowie eine unendliche Wärmekapazität. Außerdem berücksichtigt die Schätzformel das Werkzeugmaterial nicht.

Die Energiebilanz berücksichtigt die über die Zykluszeit eingebrachte Energie der Formmasse sowie der Abgänge durch Konvektion, Strahlung, Leitung und den Kühlsystem. Längere Kühlzeiten führen dabei zu einem deutlichen Rückgang der erforderlichen Kühlleistung, wodurch über den Ansatz der stationären Wärmebilanz keine exakte Auslegung des Peltier-Moduls möglich ist. Eine präzise zeitabhängige Bestimmung der benötigten Kühlleistung ist nur durch eine ganzheitliche dynamische Simulation des Werkzeugs unter Berücksichtigung aller Bauteile realisierbar. Ein verbesserter Ansatz zur Kühlleistungsabschätzung für additive Kunststoffformeinsätze ist daher wünschenswert.

Die Berechnungen zeigen jedoch auch, dass die Kühlzeiten der Formeinsätze maßgeblich abhängig von der Wärmeleitfähigkeit des Werkstoffes sind. Dementsprechend sollten neue Kunststoffsysteme mit höheren Wärmeleitfähigkeit entwickelt werden, wie Mitterlehner beschreibt [42]. Hierbei können wie in Tabelle 2 gezeigt mit Metall oder Keramik gefüllte Kunststoffsysteme zum Einsatz kommen.

Die Berechnungen verdeutlichen zudem, dass bei den in Tabelle 9 ausgewiesenen Kühlzeiten nur eine geringe Notwendigkeit für eine Peltier Kühlung besteht. Das Berechnungstool zeigt jedoch, dass für kürzere Kühlzeiten eine bestimmte Anzahl von Peltier-Elementen dimensioniert werden kann. Praktische Untersuchungen an Spiralformwerkzeugen bestätigen die hohe Genauigkeit der Kühlzeitberechnungen nach Gerke [74], die nur wenige Kelvin von den festgelegten Entformungstemperatur abweichen.

Versuche mit Peltier-Modulen belegen, dass eine konturnahe Temperierung mit einem Abstand von etwa 2 mm zur Kavität möglich ist. Thermografische Aufnahmen in Abbildung 44 zeigen, dass Peltier-Elemente entlang komplexer Konturen angeordnet werden können und sowohl zur adaptiven Kühlung als auch durch Umpolung zur lokalen Beheizung der Werkzeugoberfläche einsetzbar sind. Die Lebensdauer der Module ist jedoch durch Lötverbindungen und spröde Halbleitermaterialien limitiert, die empfindlich auf mechanische Druck- und Scherspannungen reagieren. Eine größere Distanz zwischen Modul und Kavität könnte diese Beanspruchung reduzieren, würde jedoch die Kühlleistung verringern.

Im Vergleich zu klassischen fluidischen Kühlsystemen, wie etwa wasserbasierten Kühlungen, führt die Integration von Peltier-Elementen zu einer geringeren mechanischen Belastbarkeit der Kavität. Bei fluidischen Systemen liegen die Kühlbohrungen aufgrund fertigungstechnischer Restriktionen in größerem Abstand zur Kavitätsoberfläche, wodurch das Werkzeug insgesamt eine höhere mechanische Belastbarkeit aufweist. Zudem wird durch den kontinuierlichen Wärmeabtransport in fluidischen Kühlsystemen das Werkzeug thermisch weniger stark beansprucht, was zu einer längeren Haltbarkeit des Formeinsatzes führt.

Die Kühlleistung von Peltier-Modulen ist stark vom Temperaturgradienten zwischen der heißen und der kalten Seite abhängig (vgl. Formel 13). Das Finden geeigneter Halbleiterpaarungen für spezifische Temperaturbereiche erfordert weitere Forschungsarbeit [30]. Aufgrund des Wirkprinzips als aktive Wärmepumpe ist die Leistungscharakteristik nichtlinear in Abhängigkeit von angelegter Spannung und Temperaturdifferenz, was eine präzise Regelung erschwert. Geeignete Reglerkonzepte sind jedoch bereits beschrieben [56]. Anders als bei klassischen Wärmetauschern erfolgt kein direkter Wärmeabtransport nach außen; die Wärme muss innerhalb des Werkzeugs weitergeleitet werden, was zusätzliche thermische Widerstände erzeugt.

Ein wesentlicher Vorteil des Systems liegt in der sehr schnellen Anpassung der Werkzeugtemperatur. Die Abkühlung der Oberfläche kann innerhalb weniger Sekunden erfolgen. Zudem lässt sich die entstehende Joulesche Wärme durch gezielte Umpolung

zur lokalen Erwärmung nutzen, um die Fließfähigkeit der Schmelze zu verbessern. Diese Ergebnisse stehen im Einklang mit Untersuchungen zum keramischen Spritzgießen [59] und zur Mikrospritzgießtechnik [8].

Die Integration in ein additiv gefertigtes Werkzeug bleibt jedoch herausfordernd, da sowohl der Werkzeugwerkstoff als auch die Halbleitermaterialien deutlich geringere mechanische Eigenschaften als Stahl- oder Aluminiumlegierungen aufweisen (vgl. Tab. 5, E-Modul). Ein weiterer Nachteil ist die derzeit notwendige manuelle Integration der Peltier-Module. Die Positionierung und Lötung einzelner Elemente sind zeitaufwendig und fehleranfällig. Die Integration einer großen Anzahl von Elementen ist erheblich aufwendiger als die konventionelle Herstellung von Kühlkanälen. Eine automatisierte Bestückung während des additiven Fertigungsprozesses ist bisher nicht verfügbar, da serienreife Systeme mit entsprechender Automatisierung fehlen.

Das Messkonzept zur Erfassung der Temperatur im Inneren des Werkzeugs hat sich als zielführend erwiesen. Bei der Messung der Temperatur innerhalb von 250 ms können die Messwerte mit ausreichender Genauigkeit erfasst werden. Die Messung der Temperatur über Thermoelemente könnte für die zukünftige Regelung von Bedeutung sein. Zur Bestimmung der Temperatur des Kunststoffteils nach Ablauf der Kühlzeit ist die Thermokamera eine effektive Methode, da die Temperatur kurz nach dem Öffnen des Werkzeugs beobachtet werden kann. Dies wird durch einen internen Trigger der Thermokamera ermöglicht, der die Aufnahme bei Überschreiten eines Bildschwellwertes von 35 °C auslöst. In erneuten Versuchen sollte der Start der Messungen über einen Trigger der Spritzgießmaschine ausgelöst werden.

8.2 Einsatz von additiven Kunststoffformeinsätzen im Spritzgießen

Neben der Integration der Peltier-Kühlung wird auch die Einsatzfähigkeit additiv gefertigter Kunststoffformeinsätze im Spritzgießen untersucht und mit konventionellen Formeinsätzen aus Metall verglichen.

Die Versuche mit Stahleinsätzen zeigen, dass diese insbesondere für große Stückzahlen geeignet sind, da auch bei hohen Schusszahlen kein relevanter Verschleiß festgestellt werden kann. Im Gegensatz dazu erreichen mit gefüllten Duroplasten hergestellte Einsätze eine Standzeit von mehr als 40 Zyklen, bevor erste Abnutzungserscheinungen auftreten. Die erreichbare Zykluszahl hängt dabei maßgeblich vom verwendeten Kunststoff, dem additiven Fertigungsverfahren sowie von den eingestellten Slicing-Parametern ab. Die ermittelten Werte stimmen mit den Angaben bei Mitterlehner [42] und Formlabs [40] überein.

Für die Integration beweglicher Elemente wie Auswerferstifte sind subtraktive Nachbearbeitungsschritte erforderlich, da die entsprechenden Bohrungen nicht mit ausreichender Genauigkeit und Oberflächenqualität gedruckt werden können. Ein wesentlicher Unterschied zu subtraktiv gefertigten Werkzeugen liegt in der vergleichsweise hohen Oberflächenrauheit additiv gefertigter Einsätze. Diese Rauheit ist auf den schichtweisen Aufbau zurückzuführen und führt zum typischen Treppenstufeneffekt. Durch geeignete Ausrichtung der Bauteile im Slicer sowie optimierte Slicing-Parameter lässt sich dieser Effekt reduzieren, jedoch nicht vollständig vermeiden. Sehr glatte Funktionsflächen können in der Regel nur durch eine Kombination aus additivem Grundkörper und subtraktiver Nachbearbeitung (z. B. Fräsen oder Polieren) erzielt werden.

Das Design der additiven Formeinsätze orientiert sich grundsätzlich an den Toleranzen und Schnittstellen konventioneller Werkzeuge, um Standardkomponenten wie Verschraubungen oder Auswerfersysteme übernehmen zu können. Die Untersuchungen zeigen jedoch, dass die additiven Einsätze nicht ohne weitere Bearbeitung direkt einsetzbar sind. Geometrievergleiche nach dem Drucken in Abbildung 38 belegen Maßabweichungen, die mit den Beobachtungen von Junk [52] übereinstimmen.

Hinsichtlich der maschinentechnischen Einstellparameter, insbesondere der Schließkraft, wurde die klassische Berechnungsformel angewendet. Diese führte jedoch zu überhöhten Schließkräften, die bei Vorversuchen in Kapitel 6 zum Versagen der Einsätze führten. Hier ist eine an die geringere Festigkeit der Werkstoffe angepasste Auslegung erforderlich. Auch eine Anpassung des Einspritzdruck in die Kunststoffform könnte zur längeren Standzeit des Werkzeuges beitragen.

Weitere Probleme treten beim Auswerfen komplexer Geometrien, wie der Spiralstruktur, auf. Diese resultieren vor allem aus der ungleichmäßigen Anordnung der Auswerferstifte sowie aus Überspritzungen an der Trennfuge. Letztere lassen sich auf eine unzureichend exakte Passung zwischen dem additiven Formeinsatz und der Angussdüse zurückführen. Beide Effekte führen dazu, dass das Formteil lokal verklemmt und nicht vollständig entformt werden kann.

Zur Untersuchung der Geometrie ist die Verwendung des optischen Koordinatenmessgeräts zur Analyse der Formeinsätze sinnvoll. Mit dieser Messmethode können viele Messpunkte innerhalb kurzer Zeit erfasst werden. Dadurch kann die Oberflächengeometrie schnell erfasst und ein Soll-Ist-Vergleich der Oberfläche erstellt werden. Durch die Anwendung von Stufen können die Veränderungen der additiven Kunststoffformeinsätze nach entsprechenden Intervallen beobachtet werden. Um eine In-situ-Messung in der Spritzgießmaschine zu ermöglichen, muss der Öffnungsweg erhöht und die Einbautiefe des Trägerwerkzeugs reduziert werden.

8.3 Potentialabschätzung der Peltier-Temperierung in additiven Kunststoffformeinsätzen

Wie die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, können durch den Einsatz additiver Kunststoffformeinsätze Spritzgießteile erfolgreich hergestellt werden. Die Vorteile dieser Herstellungstechnologie liegen in der schnellen Fertigung des Formeinsatzes, wodurch eine zügige Realisierung individueller Produkte wie beispielsweise patientenspezifischer Implantate oder Produkte in Kleinserien ermöglicht wird. Dies steht im Einklang mit den in Kapitel 3.1.1 beschriebenen Einsatzgebieten additiver Formwerkzeuge. Das vorgestellte System weist ein hohes Innovationspotenzial für Nischenanwendungen, den Prototypenbau und die Kleinserienfertigung auf, bei denen eine flexible Temperierung und eine schnelle Werkzeuganpassung im Vordergrund stehen. Für die Großserienfertigung mit hohen Stückzahlen und extremen mechanischen und thermischen Belastungen sind konventionelle metallische Werkzeuge derzeit weiterhin überlegen.

Die additive Fertigung von Formeinsätzen ist gegenwärtig vor allem bei kleinen Stückzahlen oder im Prototypenbau wirtschaftlich sinnvoll. Aufgrund der begrenzten Standzeit von etwa 40 bis 60 Zyklen bei gefüllten Duroplasten amortisieren sich die höheren Herstellungskosten nur bei Projekten, in denen schnelle Iterationen und kurze Entwicklungszeiten gegenüber hohen Werkzeugstandzeiten von größerer Bedeutung sind. Für große Serien mit mehreren Tausend Schuss sind klassische metallische Werkzeuge kosteneffizienter, da sie eine wesentlich höhere Lebensdauer aufweisen und weniger Nachbearbeitung erfordern. Die Skalierbarkeit des Systems auf eine industrielle Serienproduktion ist derzeit eingeschränkt, da sowohl die manuelle Integration der Peltier-Elemente als auch die notwendigen Nachbearbeitungsschritte die Automatisierung und Wiederholgenauigkeit limitieren. Für Kleinserien mit spezifischen Geometrien oder Funktionsanpassungen ist das System geeignet, für eine industrielle Massenfertigung sind jedoch robustere Automatisierungs- und Qualitätskontrollprozesse erforderlich, die bislang nicht verfügbar sind.

Die Lebensdauer der Kunststoffformeinsätze ist durch die geringe Wärmeleitfähigkeit und die eingeschränkte mechanische Festigkeit der eingesetzten Materialien begrenzt. Hohe Schließkräfte oder ungleichmäßige Belastungen führen, wie in den Versuchen gezeigt, schnell zu Ausfällen. Auch die Peltier-Module reagieren empfindlich auf mechanische Spannungen und thermische Zyklen, sodass gegenwärtig nur moderate Zykuszahlen möglich sind. Eine präzise Auslegung der Prozessparameter, insbesondere eine Reduktion der Schließkräfte, ist notwendig, um die Standzeit zu maximieren. Die Formeinsätze orientieren sich grundsätzlich an den Schnittstellen konventioneller

Spritzgießwerkzeuge und sind mit vorhandenen Komponenten wie Auswerfern oder Verschraubungen kompatibel. Dennoch sind zusätzliche Bearbeitungsschritte erforderlich, um die geforderte Passgenauigkeit und Oberflächenqualität zu erreichen. Die Integration von Peltier-Modulen erfordert darüber hinaus elektrische Anschlüsse und Kühlkonzepte, die in bestehenden Werkzeugaufbauten bisher nicht vorgesehen sind.

In stark regulierten Branchen wie der Medizintechnik oder der Luft- und Raumfahrt gelten strenge Anforderungen an Werkstoffnachweise, Prozessstabilität und Bauteilrückverfolgbarkeit. Additive Kunststoffwerkzeuge sind derzeit nur schwer qualifizierbar, da Oberflächenqualität, Maßhaltigkeit und Standzeit nur begrenzt reproduzierbar nachgewiesen werden können. Für sicherheitskritische Anwendungen ist daher bislang der Einsatz konventioneller metallischer Werkzeuge mit etablierten Prozessen erforderlich. Langfristig kann das System jedoch durch Materialverbesserungen, hybride Fertigungskonzepte und automatisierte Integrationsprozesse erheblich an Bedeutung gewinnen. Die Möglichkeit der lokalen adaptiven Temperierung eröffnet neue Freiheitsgrade im Werkzeugdesign, die in Kombination mit additiv gefertigten Strukturen ein hohes Innovationspotenzial für die Spritzgießtechnik darstellen.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Diese Arbeit befasst sich mit der Entwicklung und Untersuchung einer adaptiven Peltier-Temperierung in einem additiv gefertigten Kunststoffformeinsatz. Ziel war es, die konzeptionelle Machbarkeit der Integration eines Peltier-Systems zur variothermen Temperierung einer Spritzgießkavität nachzuweisen und zu bewerten.

Die Bedeutung dieses Ansatzes liegt in den steigenden Anforderungen an Spritzgießprozesse, bei denen kurze Kühlzeiten, hohe Maßhaltigkeit und reproduzierbare Bauteilqualität eine immer wichtigere Rolle spielen. Insbesondere Branchen wie die Medizintechnik, Mikroelektronik und Luftfahrt fordern präzise und wirtschaftliche Werkzeugkonzepte. Konventionelle Temperiersysteme stoßen hier aufgrund begrenzter Gestaltungsmöglichkeiten und mangelnder Flexibilität zunehmend an ihre Grenzen.

Die Analyse des Standes der Technik zeigt, dass Konzepte zur Peltier-Temperierung zwar bereits existieren, jedoch bislang überwiegend in kleineren Maßstäben wie Mikrospritzgießen oder der Herstellung von Keramikkomponenten im Labor eingesetzt werden. Für den praktischen Einsatz in großtechnischen Spritzgießprozessen fehlen bislang belastbare Lösungen. Additive Kunststoffformeinsätze zeigen prinzipiell Potenzial für die Integration aktiver thermoelektrischer Module, stoßen jedoch bei mechanischer und thermischer Belastung schnell an technologische Grenzen. Für einen praktischen Einsatz müssen Materialeigenschaften, Bauweisen und Integrationsmethoden gezielt weiterentwickelt werden.

Zunächst wurde die thermodynamische Auslegung einer Peltier-Kühlung vorgenommen. Hierfür wurde ein Berechnungstool auf Basis einer stationären Wärmebilanz entwickelt, das mit variablen Materialkennwerten für polymerbasierte Formeinsätze arbeitet. Es zeigte sich, dass die Kühlzeit bis zur Entformungstemperatur die entscheidende Größe für die Dimensionierung des Kühlsystems ist. Klassische Ansätze zur Berechnung der Kühlzeit sind für additive Kunststoffwerkzeuge aufgrund der deutlich geringeren Wärmeleitfähigkeit nicht anwendbar. Die Verwendung der Schätzformel nach Gerke erwies sich als geeigneter. Ergänzend wurde eine Spritzgießsimulation mit realitätsnahen Randbedingungen wie Einspritzdruck, Werkzeugtemperatur und Schließkraft durchgeführt, deren Ergebnisse vergleichbare Kühlzeiten zeigten. Auf dieser Basis wurde die erforderliche Kühlleistung und die Anzahl der dafür notwendigen Peltier-Elemente berechnet, wobei sich herausstellte, dass die stationäre Auslegung für lange Kühlzeiten ungeeignet ist und eine angepasste Berechnungsmethode erforderlich wird.

In Vorversuchen wurde zunächst ein einfaches Peltier-Modul in ein Plattenwerkzeug aus Stahl integriert, um den prinzipiellen Effekt der Temperaturabsenkung an der Werkzeugoberfläche nachzuweisen. Hierbei konnte eine maximale

Temperaturreduzierung von etwa 2 K erreicht werden. Einflussgrößen sind die angelegte elektrische Leistung sowie die Temperaturdifferenz zwischen Werkzeugoberfläche und Trägersystem. Hierfür wurden die Stromstärke- und Spannungsverläufe während des Betriebes erfasst. Die Ergebnisse der thermischen Überwachung des Werkzeuges mittels Thermalkamera und integrierten Thermoelementen bestätigten den positiven Einfluss des Kühlsystems auf die Werkzeugtemperatur. Anschließend wurde ein Peltier-Modul in einen additiv gefertigten Kunststoffformeinsatz integriert. Die prinzipielle Machbarkeit konnte gezeigt werden, jedoch sind für den praktischen Einsatz höhere Festigkeiten des Kunststoffwerkzeugs notwendig, um Schließkraft und Einspritzdruck standzuhalten. Die Erprobung des Werkzeuges führte bei erhöhter Schließkraft zu einem schnellen Versagen der Kunststoffform, speziell im Bereich der Peltier-Temperierung.

Auf Basis dieser Erkenntnisse wurde eine konturfolgende, adaptive Peltier-Temperierung für eine Fließspirale entwickelt. Dabei musste berücksichtigt werden, dass die Anordnung der Peltier-Elemente nicht in einem Schachbrettmuster erfolgen konnte, da so der Kontur nicht gefolgt werden kann. Das Drehen der Halbleitersäulen und der Verbindungsbrücken führt jedoch zu kleineren wirksamen Flächen, auf denen der Peltier-Effekt aktiv ist, und reduziert damit die Gesamtleistung der Temperierung. Zudem ist bei kurzen Kühlzeiten die Anzahl der integrierbaren Peltier-Elemente stark limitiert, da im Werkzeug nur ein begrenzter Bauraum zur Verfügung steht. Eine mögliche Lösung wäre die Schichtung eines weiteren Moduls in einer zusätzlichen Ebene.

Die Kavität der Fließspirale wurde aus Stahl und zwei Duroplasten gefertigt, während das Peltier-Modul in einen additiv gefertigten Träger integriert und zusätzlich durch eine Schutzplatte versteift wurde. Aufgrund unzureichender Lötverbindungen und Positionsabweichungen der Peltier-Elemente traten Scherspannungen auf, die letztlich zur Zerstörung der Temperiersystems führten. Die Untersuchung der Standzeit des Fließspiralen-Formeinsatzes aus dem Material Rigid 10K lieferte gute Ergebnisse hinsichtlich der gefertigten Kunststoffteile. Die Form aus dem Werkstoff VisiJet-HT-250 konnte hingegen nur einmal verwendet werden, da sie aufgrund hoher Oberflächenrauheit beim Entformen beschädigt wurde.

Begleitende geometrische Messungen der Formeinsätze mit dem Messsystem Atos Q der Firma Zeiss wiesen prozessbegleitende Verformungen der Formeinsätze über die Spritzzyklen nach. Dabei zeigte sich, dass metallische Einsätze erwartungsgemäß eine höhere Lebensdauer als Kunststoffwerkzeuge aufweisen. Darüber hinaus konnten erstmals Temperaturverläufe im Inneren der Werkzeuge gemessen und so Messwerte für eine spätere Regelung der Temperierung gesammelt werden.

Die Untersuchungen zur Beantwortung der zentralen Forschungsfrage zeigen, dass sich adaptive thermoelektrische Peltier-Module grundsätzlich in additiv gefertigte Kunststoffwerkzeuge integrieren lassen und damit eine variotherme Temperierung möglich ist. Erste Versuche belegen den prinzipiellen thermischen Effekt, jedoch treten unter realen Spritzgießbedingungen deutliche Einschränkungen auf. Die mechanische Festigkeit additiv gefertigter Kunststoffform einsätze reicht bislang nicht aus, um die Belastungen im Dauerbetrieb zuverlässig aufzunehmen.

Auf Basis des Ergebnisses leitet sich ein Potenzial für adaptive Peltier-Temperierungen in additiven Kunststoffwerkzeugen ab. Für eine industrielle-Implementierung sind jedoch weiterführender Untersuchungen notwendig. Künftig sollten spezifische Auslegungsmethoden für die Kühlleistung polymerbasierter Form einsätze entwickelt werden. Denkbar ist zudem die Entwicklung additiver Werkstoffe mit verbesserter Wärmeleitfähigkeit bei gleichzeitig hoher Festigkeit. Hier könnte der gezielte Einsatz von Füllstoffen, Hybridstrukturen oder metallischen Beschichtungen untersucht werden, um die Standzeit und die Wärmeleitfähigkeit zu erhöhen. Auch neue Halbleitermaterialien und interne Strukturen der Peltier-Module könnten helfen, Wärmeverluste zu reduzieren und die mechanische Stabilität zu steigern. Langfristig besteht ein vielversprechender Ansatz darin, die Peltier-Elemente direkt während des additiven Herstellungsprozesses zu integrieren, beispielsweise durch die Kombination hochpräziser Druckverfahren mit einer automatisierten Bestückung. Auf Basis der Integration kann im Anschluss ein Regelungskonzept erarbeitet werden, durch das das Peltier-Element sowohl zum Heizen als auch zum Kühlen genutzt werden kann. Dieses adaptive Regelsystem soll eine präzise und schnelle Anpassung der Werkzeugtemperatur ermöglichen, um den variothermen Prozess optimal zu regeln und somit die Bauteilqualität zu steigern sowie die Zykluszeit zu verbessern.

Literaturverzeichnis

1. DIN Deutsches Institut für Normung e.V. DIN 8580 Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung. Berlin: Beuth Verlag GmbH; 2024. (01.040.25; 25.020) 03.12.2024. Verfügbar unter: <https://www.nautos.de/O7K/search/item-detail/DE30088566> [Stand: 06.12.2024].
2. Hopmann C, Menges G, Michaeli W, Mohren P. Spritzgießwerkzeuge: Auslegung, Bau, Anwendung. 7., neu bearbeitete Auflage. München: Carl Hanser Verlag; 2018.
3. Johannaber F, Michaeli W. Handbuch Spritzgießen. 2. Aufl. München: Hanser; 2004. (Hanser eLibrary). Verfügbar unter: <http://www.hanser-elibrary.com/doi/book/10.3139/9783446440982>.
4. Abts G, Bonten C, Hopmann C, Michaeli W, Hrsg. Werkstoffkunde I - Hanser eCampus. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG; 2023. (Hanser eCampus).
5. Kazmer DO. Injection mold design engineering. 3rd edition. Munich: Hanser; 2022. Verfügbar unter: <https://www.sciencedirect.com/science/book/9781569908914>.
6. Fritsche C. Fachkunde Kunststofftechnik. 4., verb. Aufl. Haan-Gruiten: Verl. Europa-Lehrmittel Nourney Vollmer; 2014. (Europa-Fachbuchreihe Verfahrenstechnik der Kunststoffberufe).
7. Bührig-Polaczek A, Hrsg. Handbuch Urformen. München: Hanser; 2014. (Edition Handbuch der Fertigungstechnik).
8. Deckert MH. Beitrag zur Entwicklung eines hochdynamischen variothermen Temperiersystems für Spritzgießwerkzeuge: Universitätsverlag Chemnitz; 2012.
9. Bleesen CA. Variotherme Spritzgießtechnologie zur Beeinflussung tribologischer Eigenschaften thermoplastischer Formteile; 2016.
10. Bonnet M. Kunststofftechnik: Grundlagen, Verarbeitung, Werkstoffauswahl und Fallbeispiele. 3., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg; 2016. (Lehrbuch). Verfügbar unter: <http://www.springer.com/>.
11. Berghoff M, Kürten, Andreas, Orsen, Mikael, Praller A, inventors; Linde Aktiengesellschaft 80807 München; ISK GmbH 58638 Iserlohn. Verfahren zum Temperieren von Werkzeugen. EP 1 970 187 A1. 17.09.2008.
12. Kim M, Choi JH. Innovative rapid cooling method for injection mold using liquified CO₂. Applied Thermal Engineering 2024; 256:1–10. Verfügbar unter: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431124018192>.
13. Anders D, Reinicke U, Baum M. Analysis of heat transfer enhancement due to helical static mixing elements inside cooling channels in machine tools. Int J Adv Manuf Technol 2023; 127(5-6):2273–85. Verfügbar unter: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-023-11501-2#Sec11>.

14. Prashanth Reddy K, Panitapu B. High thermal conductivity mould insert materials for cooling time reduction in thermoplastic injection moulds. *Materials Today: Proceedings* 2017; 4(2):519–26. Verfügbar unter: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785317300524>.
15. Kartelmeyer S. Spritzgießwerkzeuge temperiert mit strukturintegrierten Heatpipes; 2024.
16. Doerffel C, Decker R, Heinrich M, Tröltzsch J, Spieler M, Nendel W et al. Polypropylene Based Piezo Ceramic Compounds for Micro Injection Molded Sensors. *KEM* 2017; 742:807–14. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.742.807.
17. Choi JH, Gim J, Rhee B. A Novel Design Method of an Evolutionary Mold Cooling Channel Using Biomimetic Engineering. *Polymers* 2023; 15(4):798. Verfügbar unter: <https://www.mdpi.com/2073-4360/15/4/798>.
18. Tan C, Di Wang, Ma W, Chen Y, Chen S, Yang Y et al. Design and additive manufacturing of novel conformal cooling molds. *Materials & Design* 2020; 196:1–10. Verfügbar unter: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127520306821>.
19. Kariminejad M, McAfee M, Kadivar M, O'Hara C, Weinert A, McGranaghan G et al. Sensorised metal AM injection mould tools for in-process monitoring of cooling performance with conventional and conformal cooling channel designs. *Journal of Manufacturing Processes* 2024; 116:25–39. doi: 10.1016/j.jmapro.2024.02.021.
20. Kretzschmar O. Rechnerunterstützte Auslegung von Spritzgießwerkzeugen mit segmentbezogenen Berechnungsverfahren [Dissertation]. Aachen: RWTH Aachen; 1985.
21. Menges G, Hoven-Nievelstein W, Schmidt W. Handbuch zur Berechnung von Spritzgießwerkzeugen. Bad Homburg: Verlag Kunststoff Informationen; 1985.
22. DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Additive Fertigung - Grundlagen - Terminologie (ISO/ASTM 52900:2021); Deutsche Fassung EN ISO/ASTM 52900:2021: DIN Media GmbH; 2022-03-00. (25.030 Additive Fertigung) 2022-03-00. Verfügbar unter: <https://www.nautos.de/O7K/search/item-detail/DE30091770> [Stand: 03.01.2025].
23. VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V. Additive Fertigungsverfahren - Grundlagen, Begriffe, Verfahrensbeschreibungen. 10772 Berlin: Beuth Verlag GmbH; 2014. (25.030 Additive Fertigung) 01.12.2014.
24. Gebhardt A. Additive Fertigungsverfahren: Additive Manufacturing und 3D-Drucken für Prototyping - Tooling - Produktion. 5., neu bearbeitete und erweiterte Auflage. München: Hanser; Ciando; 2016. Verfügbar unter: http://ebooks.ciando.com/book/index.cfm/bok_id/2203967.

25. Berger U, Hartmann A, Schmid D. 3D-Druck - Additive Fertigungsverfahren: Rapid Prototyping, Rapid Tooling, Rapid Manufacturing. 2. Auflage, mit Bilder-CD. Haan-Gruiten: Verlag Europa-Lehrmittel - Nourney Vollmer GmbH & Co. KG; 2017. (Bibliothek des technischen Wissens). Verfügbar unter: http://www.europa-lehrmittel.de/t-0/3d_druck_additive_fertigungsverfahren-3194/.
26. Gibson I. Additive manufacturing technologies. 3rd edition. Cham: Springer; 2021. (Springer eBook Collection).
27. Lachmayer R, Lippert RB, Kaierle S, Hrsg. Additive Serienfertigung: Erfolgsfaktoren und Handlungsfelder für die Anwendung. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg; 2018.
28. Lachmayer R. Entwicklungsmethodik für die Additive Fertigung: Springer Vieweg; 2020. (Springer eBook Collection).
29. DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Additive Fertigung - Grundlagen - Teil 2: Überblick über Prozesskategorien und Ausgangswerkstoffe (ISO 17296-2:2015); Deutsche Fassung EN ISO 17296-2:2016. Berlin: DIN Media GmbH; 2016-12-00. (25.030 Additive Fertigung) 2016-12-00. Verfügbar unter: <https://www.nautos.de/O7K/search> [Stand: 03.01.2025].
30. Anatyck L, Burkov A, Goldsmid HJ, Hrsg. 200 years of thermoelectricity: An historical journey through the science and technology of thermoelectric materials (1821-2021). Cham: Springer; 2024.
31. Irrgang K. Altes und Neues Zu Thermoelektrischen Effekten und Thermoelementen. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin / Heidelberg; 2020. Verfügbar unter: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=6370499>.
32. Alles über Peltier-Elemente | RS; 2024 [Stand: 17.12.2024]. Verfügbar unter: <https://de.rs-online.com/web/content/discovery-portal/produktatgeber/peltier-module-leitfaden?srsId=AfmBOop-DlrFMVg5qHBT4S2Wv3yh-Prl5d1q76SrNqomRzGn7Y-Y5TgXp>.
33. Ravindra NM, Jariwala B, Bañobre A, Maske A. Thermoelectrics: Fundamentals, Materials Selection, Properties, and Performance. Cham: Springer International Publishing; 2019. (SpringerLink Bücher).
34. SITUS Technicals. Grundlagen Peltierelement. Verfügbar unter: <file:///C:/Users/com18iru/Downloads/Grundlagen-Peltier-4.pdf>.
35. Goldsmid HJ. Introduction to Thermoelectricity. 2nd ed. 2016. Berlin, Heidelberg: Springer; 2016. (SpringerLink Bücher; Bd. 121).
36. Maciá E, Hrsg. Thermoelectric materials: Advances and applications. Boca Raton, Fla.: Pan Stanford; 2015. Verfügbar unter: <http://www.crcnet-base.com/doi/book/10.1201/b18439>.

37. formlabs. Rapid Tooling Tooling für die Kleinserienfertigung mit traditionellen Fertigungsverfahren; 2025 [Stand: 14.04.2025]. Verfügbar unter: https://formlabs.com/de/applications/rapid-tooling/?srsId=AfmBOoqc9X_6KttODs-wNxnjl6eJ448O3a9AXSBFOlg818p2bvos282Cj.
38. Pelin G, Sonmez M, Pelin C-E. The Use of Additive Manufacturing Techniques in the Development of Polymeric Molds: A Review. *Polymers* 2024; 16(8):1055. Verfügbar unter: <https://www.mdpi.com/2073-4360/16/8/1055>.
39. Whlean C, Sheahan C. Using Additive Manufacturing to Produce Injection Moulds Suitable for Short Series Production. *Procedia Manufacturing* 2019; 38:60–8. Verfügbar unter: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978920300081>.
40. formlabs. Low-Volume Rapid Injection Molding With 3D Printed Molds; 2020 [Stand: 14.04.2025].
41. Dempsey D, McDonald S, Masato D, Barry C. Characterization of Stereolithography Printed Soft Tooling for Micro Injection Molding. *Micromachines (Basel)* 2020; 11(9). doi: 10.3390/mi11090819.
42. Mitterlehner T. Auslegung und Charakterisierung additiv gefertigter Formeinsätze für Spritzgießwerkzeuge / eingereicht von Thomas Mitterlehner BSc MSc; 2020. Verfügbar unter: <https://epub.jku.at/obvulihs/content/titleinfo/5343221>.
43. Benitez-Lozano A, Vargas-Isaza C, Montealegre-Rubio W. Development, Simulation of Temperatures, and Experimentation in Injection Molds Obtained through Additive Manufacturing with Photocurable Polymeric Resins. *Polymers* 2023; 15(5):1071. Verfügbar unter: <https://www.mdpi.com/2073-4360/15/5/1071>.
44. König C, König M, Richter A. 3Dgedruckte Spritzgusseinsätze mittels DLP-Verfahren: Eine Fallstudie zu BASF Ultracur3D® RG 3280. *BASF Forward AM*; 2023 [Stand: 11.04.2025].
45. Prigann D. Beitrag zur Entwicklung 3D-gedruckter Formeinsätze (FFF) für das Spritzgießen von Kunststoffbauteilen; 2023. Verfügbar unter: https://dokumente.ub.tu-clausthal.de/receive/clausthal_mods_00002456.
46. Lušić M, Barabanov A, Morina D, Feuerstein F, Hornfeck R. Towards Zero Waste in Additive Manufacturing: A Case Study Investigating one Pressurised Rapid Tooling Mould to Ensure Resource Efficiency. *Procedia CIRP* 2015; 37:54–8. doi: 10.1016/j.procir.2015.08.022.
47. Schuh G, Bergweiler G, Lukas G, Abrams JA. Feasibility and Process capability of polymer additive injection molds with slide technology. *Procedia CIRP* 2020; 93:102–7. Verfügbar unter: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221282712030665X>.

48. Kuo C-C, Jiang Z-F, Yang M-X, You B-J, Zhong W-C. Effects of cooling channel layout on the cooling performance of rapid injection mold. *Int J Adv Manuf Technol* 2021; 114(9-10):2697–710. doi: 10.1007/s00170-021-07033-2.
49. Huzaim NHM, Rahim SZA, Musa L, Abdellah AE, Abdullah, Mohd Mustafa Al Bakri, Rennie A et al. Potential of Rapid Tooling in Rapid Heat Cycle Molding: A Review. *Materials* 2022; 15(10):3725. Verfügbar unter: <https://www.mdpi.com/1996-1944/15/10/3725>.
50. Krizma S, Széplaki P, Suplicz A. Coupled injection moulding simulation–thermal and mechanical simulation method to analyse the operational behaviour of additively manufactured polymeric injection moulds. *Results in Engineering* 2024; 23:102558. doi: 10.1016/j.rineng.2024.102558.
51. Gerret L. Gestaltungsmodell zur thermischen Auslegung additiver Prototypenwerkzeuge aus Kunststoff; 2024.
52. Junk S, Schrock S, Schmieder N. Review and Development of Design Guidelines for Additive Tooling of Injection Molds Using PolyJet Modelling. In: *Industrializing Additive Manufacturing: Proceedings of AMPA2023*. Cham: Springer International Publishing AG; 2024. S. 35–45 [Springer Tracts in Additive Manufacturing Series]. Verfügbar unter: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-42983-5_3.
53. Vidhata Plastics. How Thermoelectric Coolers Enhance Plastic Injection Moulding Efficiency; 2025 [Stand: 03.04.2025]. Verfügbar unter: <https://www.vidhata.co.in/post/how-thermoelectric-coolers-enhance-plastic-injection-moulding-efficiency>.
54. Stroemblad J, Johansson V, Gunnar M, inventors; ASEA AB. Gieß Spritz oder Preßform. 2046526A. 29.04.1971.
55. Bleier Herald, Gornik Christian, inventors; Battenfeld GmbH, 58540 Meinerzhagen, DE. Erwärmung einer Werkzeugkavität eines Spritzgießwerkzeuges. DE 101 36 678 B4 2004.09.30. 30.09.2004.
56. Nardin B, Žagar B, Glojek A, Križaj D. Adaptive system for electrically driven thermoregulation of moulds for injection moulding. *Journal of Materials Processing Technology* 2007; 187-188:690–3. Verfügbar unter: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013606009654>.
57. Lee M, Kwon Y-S, Lee C-K. Effect of warpage on the operation of a rapid cooling and heating device. *J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* 2019; 41(8). doi: 10.1007/s40430-019-1806-8.
58. H. Shin, J. Kwon, N.Hong, Y. Seo, B. Kim. A method for Thermal Control of Nano Injection Molding using the Peltier Devices. *Transactions of Materials Processing* 2008; 17(5):337–42. doi: 10.5228/KSPP.2008.17.5.337.

-
59. Bianchi MF, Gameros AA, Axinte DA, Lowth S, Cendrowicz AM, Welch ST. Regional temperature control in ceramic injection moulding: An approach based on cooling rate optimisation. *Journal of Manufacturing Processes* 2021; 68:1767–83. doi: 10.1016/j.jmapro.2021.06.069.
 60. CNC Fertigungstechnik GmbH. Werkstoff-Datenblatt Stahl C45; 2025 [Stand: 08.06.2025]. Verfügbar unter: <https://www.cnc.at/materialien>.
 61. Kern GmbH. Acrylnitril/Butadien/Styrol (ABS) Datenblatt KERN; 2025 [Stand: 07.06.2025]. Verfügbar unter: https://www.kern.de/de/technisches-datenblatt/acrylnitril-butadien-styrol-abs?n=2110_1.
 62. material HUB. Ertalon® 6 PLA | Materialien | Material Hub; 2025 [Stand: 07.06.2025]. Verfügbar unter: <https://www.materialhub.de/materialien/mitsubishi-chemical-advanced-materials-ertalon-6-pla>.
 63. k-tec GmbH. Materialinformationen Polyethylenterephthalat Glykol (PETG); 2025 [Stand: 08.06.2025]. Verfügbar unter: https://ktec.at/wp-content/uploads/2018/11/Allgemeine-Materialinformation-PETG_Logo_Acrylglassverarbeitung.pdf.
 64. Klaudia Kresse, Melanie Voß. Extended TDS_Ultrasint PA11 Black CF: FORWARD AM; 2025 [Stand: 08.06.2025]. Verfügbar unter: https://move.forward-am.com/hubfs/PBF%20Documentation/PA11%20Line/PA11%20CF/BASF_3DPS_TDS_Ultrasint_PA11-Black_CF.pdf.
 65. Kern GmbH. Polyetheretherketon PEEK Datenblatt; 2025 [Stand: 07.06.2025]. Verfügbar unter: https://www.kern.de/de/technisches-datenblatt/polyetheretherketon-peek?n=1701_1.
 66. Kern GmbH. Polyetherimid PEI Datenblatt | KERN; 2025 [Stand: 07.06.2025]. Verfügbar unter: https://www.kern.de/de/technisches-datenblatt/polyetherimidpei?n=2501_1.
 67. Kern GmbH. Phenolharz PF 31 Datenblatt | KERN; 2025 [Stand: 07.06.2025]. Verfügbar unter: https://www.kern.de/de/technisches-datenblatt/phenolharz-pf-31?n=2701_1.
 68. Kern GmbH. Polyesterharz mit Kurzglasfaser Datenblatt | KERN; 2025 [Stand: 07.06.2025]. Verfügbar unter: https://www.kern.de/de/technisches-datenblatt/polyesterharz-up-4385?n=2756_1.
 69. Neumeyer T. Kohlenstoffaser-Epoxydharz-Verbunde mit erhöhter Wärmeleitfähigkeit: Struktur und Eigenschaften [Dissertation]. Bayreuth: Universität Bayreuth; 2021.
 70. formlabs. formlabs-rigid-10k-sds-de; 2025 [Stand: 08.06.2025].
 71. Steinmann B. Safety Data Sheet VisiJet M2S-HT250; 2025 [Stand: 07.06.2025].
 72. formlabs. Sicherheitsdatenblatt High Temp V2 Resin; 2025 [Stand: 08.06.2025].
-

-
73. Chemietechnik R. Reichelt Chemietechnik; 2025 [Stand: 25.06.2025]. Verfügbar unter: <https://www.rct-online.de/de/RctGlossar/detail/id/9>.
 74. Gerke P. Abschätzung der Kühlzeit beim Spritzgießen. Zeitschrift für angewandte Kunststofftechnik 2023; 1. doi: 10.60673/ZAK.2024.36.
 75. Registered to: BOREALIS. PDSApplication Daploy TM WB140HMS; 2025 [Stand: 19.06.2025]. Verfügbar unter: <https://www.borealisgroup.com/products/product-catalogue/daploy-wb140hms>.
 76. Adaptive Power Management. Datenblatt GM200-71-14-16. Verfügbar unter: www.etdyn.com.

Verzeichnis der Anlagen

Anhang 1:	Numerisches Kühlergebnis Solidworks Plastics C45	XXI
Anhang 2:	Numerisches Kühlergebnis Solidworks Plastics Pa 11 CF	XXII
Anhang 3:	Numerisches Kühlergebnis Solidworks Plastics Rigid 10K	XXIII
Anhang 4:	Numerisches Kühlergebnis Solidworks Plastics High Temp	XXIV
Anhang 5:	Numerisches Kühlergebnis Solidworks Plastics Visijet-HT-250.....	XXV

Anhang 1: Numerisches Kühlergebnis Solidworks Plastics C45

Westsächsische Hochschule Zwickau

26.05.2025

Kühlungsergebnisse C45

Kühlungsübersicht

Mittelwert der Kühlzeit	19.70 sec
Mittelwert der Formteilterperatur	85.13 °C
Mittelwert der Werkzeugwandtemperatur	30.61 °C
Mittlerer Wärmefluss über die Werkzeugwand	-0.59 J/cm2-sec
Mittlere Wärmespeicherung im Formteil und Werkzeug	-24.50 J/cm2
Mittlerer Wärmefluss im Kühlsystem	6.20 J/cm2-sec
Mittlere Wärmespeicherung im Kühlsystem	258.52 J/cm2
Temperaturbereich im Formteil	26.10 ~ 159.44 °C
Temperaturbereich im Werkzeugwandbereich	25.44 ~ 33.40 °C
Wärmestromdichte der Werkzeugkavität	-1.26 ~ 0.29 J/cm2-sec
Wärmelastbereich der Werkzeugkavität	-52.59 ~ 12.05 J/cm2
Wärmeflussbereich im Kühlsystem	-8.09 ~ 1415.78 J/cm2-sec
Abweichung der Wärmespeicherung im Kühlsystem	-337.39 ~ 59023.71 J/cm2
Total CPU Time	2658.08 sec

Anhang 2: Numerisches Kühlergebnis Solidworks Plastics Pa 11 CF

Westsächsische Hochschule Zwickau

25.06.2025

Kühlungsergebnisse

Kommentare:

Kühlungsübersicht

Mittelwert der Kühlzeit	230.45 sec
Mittelwert der Formteilterperatur	93.50 °C
Mittelwert der Werkzeugwandtemperatur	86.50 °C
Mittlerer Wärmefluss über die Werkzeugwand	-0.08 J/cm2-sec
Mittlere Wärmespeicherung im Formteil und Werkzeug	-23.12 J/cm2
Mittlerer Wärmefluss im Kühlsystem	0.14 J/cm2-sec
Mittlere Wärmespeicherung im Kühlsystem	39.94 J/cm2
Temperaturbereich im Formteil	54.54 ~ 112.63 °C
Temperaturbereich im Werkzeugwandbereich	51.71 ~ 100.23 °C
Wärmestromdichte der Werkzeugkavität	-0.18 ~ 0.01 J/cm2-sec
Wärmelastbereich der Werkzeugkavität	-52.88 ~ 3.89 J/cm2
Wärmeflussbereich im Kühlsystem	0.04 ~ 4.29 J/cm2-sec
Abweichung der Wärmespeicherung im Kühlsystem	11.35 ~ 1235.42 J/cm2
Total CPU Time	2913.25 sec

Anhang 3: Numerisches Kühlergebnis Solidworks Plastics Rigid 10K

Westsächsische Hochschule Zwickau

25.06.2025

Kühlungsergebnisse

Kommentare:

Kühlungsübersicht

Mittelwert der Kühlzeit	387.31 sec
Mittelwert der Formteiltemperatur	82.52 °C
Mittelwert der Werkzeugwandtemperatur	78.68 °C
Mittlerer Wärmefluss über die Werkzeugwand	-0.04 J/cm2-sec
Mittlere Wärmespeicherung im Formteil und Werkzeug	-22.57 J/cm2
Mittlerer Wärmefluss im Kühlsystem	-0.48 J/cm2-sec
Mittlere Wärmespeicherung im Kühlsystem	-243.17 J/cm2
Temperaturbereich im Formteil	50.37 ~ 95.51 °C
Temperaturbereich im Werkzeugwandbereich	48.33 ~ 89.52 °C
Wärmestromdichte der Werkzeugkavität	-0.10 ~ 0.01 J/cm2-sec
Wärmelastbereich der Werkzeugkavität	-52.61 ~ 6.30 J/cm2
Wärmeflussbereich im Kühlsystem	-46.58 ~ -0.07 J/cm2-sec
Abweichung der Wärmespeicherung im Kühlsystem	-23759.49 ~ -34.48 J/cm2
Total CPU Time	5415.91 sec

Anhang 4: Numerisches Kühlergebnis Solidworks Plastics High Temp

Westsächsische Hochschule Zwickau

25.06.2025

Kühlungsergebnisse

Kommentare:

Kühlungsübersicht

Mittelwert der Kühlzeit	359.29 sec
Mittelwert der Formteilvertemperatur	81.52 °C
Mittelwert der Werkzeugwandtemperatur	77.43 °C
Mittlerer Wärmefluss über die Werkzeugwand	-0.05 J/cm ² -sec
Mittlere Wärmespeicherung im Formteil und Werkzeug	-22.56 J/cm ²
Mittlerer Wärmefluss im Kühlsystem	-0.52 J/cm ² -sec
Mittlere Wärmespeicherung im Kühlsystem	-250.67 J/cm ²
Temperaturbereich im Formteil	49.56 ~ 95.03 °C
Temperaturbereich im Werkzeugwandbereich	47.51 ~ 88.56 °C
Wärmestromdichte der Werkzeugkavität	-0.11 ~ 0.01 J/cm ² -sec
Wärmelastbereich der Werkzeugkavität	-52.87 ~ 6.35 J/cm ²
Wärmeflussbereich im Kühlsystem	-51.07 ~ -0.07 J/cm ² -sec
Abweichung der Wärmespeicherung im Kühlsystem	-24518.39 ~ -35.50 J/cm ²
Total CPU Time	5905.53 sec

Anhang 5: Numerisches Kühlergebnis Solidworks Plastics Visijet-HT-250

Westsächsische Hochschule Zwickau

25.06.2025

Kühlungsergebnisse

Kommentare:

Kühlungsübersicht

Mittelwert der Kühlzeit	356.84 sec
Mittelwert der Formteilmperatur	81.71 °C
Mittelwert der Werkzeugwandtemperatur	77.58 °C
Mittlerer Wärmefluss über die Werkzeugwand	-0.05 J/cm2-sec
Mittlere Wärmespeicherung im Formteil und Werkzeug	-22.54 J/cm2
Mittlerer Wärmefluss im Kühlsystem	-0.52 J/cm2-sec
Mittlere Wärmespeicherung im Kühlsystem	-249.58 J/cm2
Temperaturbereich im Formteil	49.61 ~ 95.34 °C
Temperaturbereich im Werkzeugwandbereich	47.55 ~ 88.83 °C
Wärmestromdichte der Werkzeugkavität	-0.11 ~ 0.01 J/cm2-sec
Wärmelastbereich der Werkzeugkavität	-52.89 ~ 6.37 J/cm2
Wärmeflussbereich im Kühlsystem	-51.22 ~ -0.07 J/cm2-sec
Abweichung der Wärmespeicherung im Kühlsystem	-24385.66 ~ -35.33 J/cm2
Total CPU Time	4455.92 sec