

Schlussbericht

zu IGF-Vorhaben Nr. 20737 N

Thema

Verfahren zur lokalen aktiven Kühlung im Thermoformen für eine verbesserte Wanddickenverteilung der resultierenden Formteile

Berichtszeitraum

01.07.2019 - 30.06.2021

Forschungsvereinigung

Kunststoffverarbeitung

Forschungseinrichtung(en)

Institut für Kunststoffverarbeitung in Industrie und Handwerk an der RWTH Aachen

Aachen, 02.12.2021

Univ. Prof. Dr.-Ing. Christian Hopmann

Ort, Datum

Name und Unterschrift aller Projektleiterinnen und Projektleiter der
Forschungseinrichtung(en)

Gefördert durch:

Kurzzusammenfassung zum Forschungsvorhaben 20737 N

Zur Anpassung der Wanddickenverteilung wurde der Einsatz einer aktiven lokalen Folienkühlung im Thermoformen an rotationssymmetrischen Becherformteilen erprobt. Das lokale Abkühlen der Folie zielt darauf ab, die Verstreckwiderstände der Folie so zu beeinflussen, dass die sonst inhomogene Wanddickenverteilung der Formteile vergleichmäßigt wird. Die Kühlstempel, die den klassischen Vorstreckstempel ersetzen, sind mittels Kohlenstoffdioxid (CO₂) gekühlt. Es wurden Kühlstempeltemperaturen von 10 °C bzw. 20 °C gewählt. Die gekühlten Stempel entziehen der Folie lokal Wärme, sodass gekühlte Bereiche der Folie weniger verstreckt werden als Bereiche, die eine höhere Folientemperatur beim Umformvorgang aufweisen. Da die Temperatursgleichungsvorgänge in der Folie langsamer ablaufen als die Umformung, müssen Kontaktzeiten zwischen Folie und Kühlstempel bis zum Einsetzen der Formluft vorgesehen werden. Die verlängerten Kontaktzeiten ermöglichen es, die Folie über der gesamten Foliendicke zu kühlen.

Numerische Simulationen sowie praktische Untersuchungen haben gezeigt, dass eine Anpassung der Wanddickenverteilung durch den Einsatz der lokalen Kühlung möglich ist. Die Ausprägung der resultierenden Wanddickenverteilung kann besonders durch die Kühlstempelgeometrie sowie die Kontaktzeit zwischen Folie und Kühlstempel beeinflusst werden. Durch die Änderung des Kühlstempelradius können unterschiedliche Formteilbereiche in ihrer Dicke angepasst werden. Bei der Durchführung der Versuche konnte bei Verwendung eines Becherformteils mit 60 mm Durchmesser, einer Tiefe von 40 mm sowie einer Entformungsschräge von 4° die Wanddickenverteilung mit einem Kühlstempeldurchmesser von 30 mm homogenisiert werden. In Abhängigkeit weiterer Prozesseinstellungen wie Kontaktzeiten oder einem Stempelüberstand, der die Kontaktzeit weiter erhöht, ist die Wanddickenverteilung weiter in ihrer lokalen Ausprägung einstellbar. Eine globale Änderung der Wanddickenverteilung wird jedoch hauptsächlich über die Änderung des Kühlstempelradius erzeugt. Eine Übertragung der Erkenntnisse auf weitere Geometrien ist möglich. Allerdings muss bei großen Formteilen mit großen Formflächen der Foliendurchhang berücksichtigt werden, da dieser sonst Einfluss auf die Kontaktbedingungen zwischen Folie und Stempel aufweist und die Kühlleistung durch einen größeren Abstand der beiden Kontaktpartner reduziert.

Insgesamt zeigen sowohl die Simulationen als auch die Experimente, dass die Wanddickenverteilung der Formteile durch die aktive Kühlung beeinflussbar ist.

Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.

DANKSAGUNG

Die nachfolgend beschriebenen und erläuterten Untersuchungen wurden im Rahmen des IGF-Vorhabens 20737 N der Forschungsvereinigung Kunststoffverarbeitung über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Der vorliegende Bericht ist der Schlussbericht des Forschungsvorhabens.

Ein wesentlicher Teil der Ergebnisse wurde von Herrn Dennis Balcerowiak, M.Sc. RWTH erarbeitet und teilweise von Studierenden der RWTH Aachen in Form von verschiedenen studentischen Arbeiten niedergelegt. Die Zusammenfassung von jeder dieser Arbeiten befindet sich im Anhang. Diese Arbeiten sind nicht zur Veröffentlichung vorgesehen, können aber in der Bibliothek des Instituts für Kunststoffverarbeitung eingesehen werden.

Eine Gesamtdarstellung des Themenkreises, zu dem dieses Forschungsvorhaben gehört, wird in einem technisch-wissenschaftlichen Bericht des Instituts für Kunststoffverarbeitung nach Abschluss der Arbeiten erfolgen.

Dem Deutschen Bundestag, dem BMWi, der AiF und der AiF-Mitgliedsvereinigung Kunststoffverarbeitung gilt unser Dank. Darüber hinaus gilt unser Dank allen Firmen, die durch Bereitstellung von Kunststoffen, Maschinen und sonstigen Sachmitteln diese Arbeit unterstützt haben.

Danken möchten wir auch den Mitarbeitern der Fachbeiratsgruppe Blasformen sowie den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses, die durch Rat und Tat die Untersuchungen unterstützt haben.

1	ZUSAMMENFASSUNG	1
2	EINLEITUNG UND MOTIVATION.....	3
3	STAND DER TECHNIK UND FORSCHUNG ZUR STEIGERUNG DER MATERIALEFFIZIENZ THERMOGEFORMTER PRODUKTE.....	5
4	ZIELSETZUNG UND LÖSUNGSWEG	8
5	VERWENDETE MATERIAL, ANLAGEN- UND WERKZEUGTECHNIK, METHODISCHES VORGEHEN SOWIE INBETRIEBNAHME DER KÜHLSTEMPEL	9
5.1	Verwendete Anlagen- und Werkzeugtechnik sowie Materialien	9
5.2	Auswahl der Stempelkühlung sowie ausgewählte Kühlstempelgeometrien	10
5.3	Darstellung der Ergebnisse.....	11
5.4	Methodisches Vorgehen	12
6	ERPROBUNG DES THERMOFORMENS MITTELS LOKALER AKTIVER KÜHLUNG.....	13
6.1	Einfluss der Stempelgeometrie und -temperatur auf die resultierenden Halbzeugtemperaturprofile ohne Verzögerungszeit	14
6.2	Resultierende Wanddickenverteilung nach lokaler Kühlung der Folie ohne Verzögerungszeit..	15
6.3	Beeinflussung der Temperaturprofile durch Änderung der Kühlstempelposition	16
7	SIMULATION DES THERMOFORMPROZESSES MIT LOKALER AKTIVER KÜHLUNG	19
7.1.1	Verwendete Randbedingungen.....	20
7.1.2	Materialcharakterisierung und Materialmodell zur Beschreibung der Dehnviskosität.....	22
7.2	Anpassung des Wärmeübergangskoeffizienten	22
7.5	Vergleich der simulierten sowie realen Wanddickenverteilungen	27
8	VERFAHRENSTECHNISCHE UNTERSUCHUNGEN DES EINFLUSSES DER LOKALEN KÜHLUNG AUF DIE RESULTIERENDEN TEMPERATURPROFILE SOWIE WANDDICKENVERTEILUNGEN	29
8.1	Einfluss der Kontaktzeit sowie des Stempelüberstands auf die resultierenden Temperaturprofile	29
8.2	Einfluss der Kontaktzeit sowie des Stempelüberstands auf die resultierenden Wanddickenverteilungen	29
8.3	Einfluss des Kühlstempeldurchmessers auf die Wanddickenverteilung	31
8.4	Einfluss des Kühlstempelverrundungsradius auf die Wanddickenverteilung	32
8.5	Einfluss einer PTFE-Stempelbeschichtung sowie der Einfluss von Kupferkühlstempeln auf die Wanddickenverteilung.....	33
8.6	Einfluss der Folientemperatur auf die Wanddickenverteilung	35
8.7	Einfluss der Foliendicke auf die Wanddickenverteilung	36
8.8	Einfluss eines Vakuums zur Verstärkung des Kontakts zwischen Kühlstempel und Folie	37
8.9	Zusammenfassung der minimalen Wanddicke sowie der maximalen Wanddickendifferenzen bei verschiedenen Stempelgeometrien sowie Prozesseinstellungen.....	38

9	ENTWICKLUNG EINES LEITFADENS ZUR AUSLEGUNG DER AKTIVEN KÜHLUNG IM THERMOFORMEN	39
9.1	Übertragung der Ergebnisse auf weitere Folienmaterialien, Werkzeuggeometrien sowie Kühlstempel am Beispiel eines Schalenbauteils.....	43
9.1.1	Wanddickenverteilungen bei Verwendung von PP und aPET.....	43
9.1.2	Wanddickenverteilung bei veränderter Werkzeuggeometrie.....	44
9.1.3	Übertragung der Ergebnisse auf ein Schalenbauteil sowie resultierende Wanddickenverteilung	45
10	FAZIT UND AUSBLICK	48
11	ABKÜRZUNGEN, FORMELZEICHEN, INDIZES.....	50
11.1	Abkürzungen	50
11.2	Formelzeichen.....	50
11.3	Indizes.....	51
12	EINSATZ VON GERÄTEN, WISSENSCHAFTLICH TECHNISCHEM PERSONAL UND LEISTUNGEN DRITTER	52
13	WIRTSCHAFTLICHE BEDEUTUNG FÜR KMU.....	53
13.1	Möglicher Beitrag zur Steigerung der Leistungs- und Wettbewerbsfähigkeit der kmU	53
13.2	Aussagen zur voraussichtlichen industriellen Nutzung der FuE-Ergebnisse nach Projektende..	54
14	PLAN ZUM ERGEBNISTRANSFER IN DIE WIRTSCHAFT	55
15	EINSCHÄTZUNG DER REALISIERBARKEIT DES VORGESCHLAGENEN UND AKTUALISIERTEN TRANSFERKONZEPTS	59
16	NOTWENDIGKEIT UND ANGEMESSENHEIT DER DURCHFÜHRTEN ARBEITEN	60
17	LITERATUR.....	61
18	ANHANG.....	64
18.1	Skripte zur Übergabe der Folientemperatur sowie der Folienverformung durch den Kühlstempel	64
18.1.1	Verformung	64
18.1.2	Temperatur	67
18.2	Materialcharakterisierung und Modellierung.....	73
18.2.1	Ermittlung der Materialdaten - Reckrahmen	73
18.2.2	Hyperelastisches Materialmodell nach Yeoh.....	73
18.3	Veröffentlichungen.....	75
18.4	Kurzzusammenfassungen der durchgeführten studentischen Arbeiten.....	76

1 ZUSAMMENFASSUNG

Beim Thermoformen beläuft sich der Materialkostenanteil thermogeformter Produkte auf bis zu 90 %. Eine materialeffiziente Produktion ist somit entscheidend für die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens. Eine Möglichkeit zur Steigerung der Materialeffizienz bietet die Anpassung der prozessbedingten, inhomogenen Wanddickenverteilungen. Dazu wurden Kühlstempel eingesetzt, die die Verstrekwiderstände der Folien durch eine lokale Temperaturänderung beeinflussen und so eine Anpassung bzw. Vergleichmäßigung der Wanddickenverteilung ermöglichen. Durch den Einsatz der Temperaturprofilierung mittels aktiver lokaler Kühlung konnte eine Vergleichmäßigung erzielt werden.

Zur Erprobung der lokalen Kühlung im Thermoformen wurden durch Kohlenstoffdioxid gekühlte Kühlstempel entwickelt, die den klassischen Vorstreckstempel im Thermoformwerkzeug ersetzen. Weiterhin wurde eine Simulationsroutine aufgebaut, die es ermöglicht den Prozess virtuell abzubilden und so die Auslegung der Kühlstempelgeometrie sowie die Wahl der Prozesseinstellungen zu vereinfachen bzw. zu verkürzen. Durch die experimentelle Erprobung sowie simulative Abbildung des Prozesses konnte ermittelt werden, dass insbesondere der Stempeldurchmesser und die Kontaktzeit zwischen Stempel und Folie einen besonders großen Einfluss auf das Ausformresultat aufweisen. Weiterhin konnte durch Verrundungsradien am Kühlstempel, durch Stempel- sowie Folientemperatur und durch Position des Kühlstempels im Werkzeug Einfluss auf die Wanddickenverteilung genommen werden. Es zeigte sich jedoch, dass durch die Kühlstempel- und Folientemperatur sowie die Kühlstempelposition die Wanddickenverteilung nur in ihrer lokalen Ausprägung beeinflusst und nicht grundlegend verändert wird. Die Bereiche, die auf der Folie gekühlt werden müssen, um die Wanddickenverteilung zu vergleichmäßigen, sind somit von besonderer Bedeutung und unterscheiden sich des Weiteren vom eingesetzten Folienmaterial. Am Beispiel von Polystyrol sowie einem Becherformteil, das einen Öffnungsdurchmesser von 60 mm, eine Tiefe von 40 mm und eine Entformungsschräge von 4° aufweist, führten Kühlstempeldurchmesser von 30 mm bzw. 35 mm zu den homogensten Wanddickenverteilungen. Welcher Durchmesser gewählt werden sollte, ist wiederum von den weiteren Prozesseinstellungen abhängig, die sich gegenseitig beeinflussen. Prinzipiell erwiesen sich Kontaktzeiten von 0,1 s und 0,2 s (2 bis 3 s bei Polypropylen (PP)) als sinnvoll. Wurde die Stempelposition so angepasst, dass der Kühlstempel in die Kavität hineinragt, reichten durch den vorzeitigen Kontakt der Folie mit dem Stempel kürzere Kontaktzeiten bis zum Zuschalten der Formluft, die den Kontakt zwischen Kühlstempel und Folie unterbricht, aus, um die Wanddickenverteilung zu beeinflussen. Die erzeugten Temperaturdifferenzen auf der Polystyrol(PS)-Folie betragen bis zu 12 °C bei einer Folienausgangstemperatur von 120 °C. Die maximale Wanddickendifferenz zwischen einem Formteil, das ohne den Einsatz

der Temperaturprofilierung hergestellt wurde und einem Formteil mit Temperaturprofilierung konnte so von 0,42 mm auf 0,30 mm reduziert werden. Insgesamt wird jedoch die Dicke des Formteilmittels bzw. des Bereichs unter dem Kühlstempel besonders stark beeinflusst. Der Wanddickenverlauf der Seitenwand der Formteile verbleibt bei allen eingesetzten Kühlstempeln sehr ähnlich, da diesem Folienbereich durch den Kühlstempel keine Wärme entzogen wird.

Durch die experimentellen Untersuchungen konnte weiterhin gezeigt werden, dass die Reproduzierbarkeit des Prozesses beim Einsatz verschiedener Kunststoffe unterschiedlich hoch ist. Während bei PS hohe Standardabweichungen insbesondere im Bereich des Stempelkontakts entstanden (Schreckmarken), wiesen die aus PP hergestellten Formteile innerhalb einer Versuchsreihe größere Schwankungen der Wanddicken über das gesamte Formteil auf, was auf die Wellung der Folie nach dem Aufheizen zurückgeführt werden konnte. Die Kontaktbedingung zwischen Folie und Kühlstempel unterscheiden sich in Abhängigkeit der entstehenden Wellung. Bei Materialien, die zur Wellenbildung neigen, sollte diese ausgeglichen werden, um reproduzierbare Wanddickenverteilung bzw. Formteile mit gleichbleibender Qualität fertigen zu können.

Aufgrund der Vielzahl der möglichen Einflussgrößen ist eine Vorauslegung des Prozesses mit der Simulation empfehlenswert. Die aufgebaute Simulationsroutine zeigte, dass die Simulation des Prozesses möglich ist. Es konnten physikalisch sinnvolle Temperaturprofile sowie Wanddickenverteilung simuliert werden. Die simulierten Wanddickenverteilungen wurden qualitativ richtig abgebildet. Quantitativ ergaben sich zum Teil größere Abweichungen zu den experimentell ermittelten Wanddicken. Dies konnte darauf zurückgeführt werden, dass die für die Umformsimulation ermittelten temperaturabhängigen Materialdaten des verwendeten Kunststoffs nicht fein genug aufgelöst wurden. Zur genaueren Vorhersage ist somit eine detaillierte Beschreibung des Materialumformverhaltens empfehlenswert. Eine besondere Herausforderung ist des Weiteren die Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten für die Simulation. Die aus der Literatur ausgewählten Werte führten nicht zu den real gemessenen Temperaturverteilungen, sodass der Wärmeübergangskoeffizient durch einen Reverse-Engineering-Ansatz angepasst werden musste. Zum Ermitteln des benötigten Wärmeübergangskoeffizienten sind daher weiterhin experimentelle Untersuchungen notwendig, die jedoch für jedes neue Folienmaterial erneut durchgeführt werden müssen, da sich die resultierenden Wärmeübergangskoeffizienten ändern. Zusammenfassend konnte gezeigt werden, dass die Temperaturprofilierung mittels aktiver Kühlung umsetzbar ist und die Wanddickenverteilung angepasst werden können.

Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.

2 EINLEITUNG UND MOTIVATION

Das Thermoformen ist ein Umformverfahren, mit dem insbesondere Thermoplaste verarbeitet werden. Die hergestellten Produkte werden hauptsächlich in der Verpackungs- und Automobilindustrie angewendet, wobei die Verpackungsbranche dabei den größten Anteil aufweist [IS16, TB99]. In Anbetracht der steigenden Produktionsmenge ist neben wirtschaftlichen Aspekten eine Optimierung der gesamten Wertschöpfungskette hinsichtlich der Nachhaltigkeit und somit der Materialeffizienz erforderlich [DM20, Leo17, NN20, WL19].

Um die Wirtschaftlichkeit der Herstellung und die Nachhaltigkeit thermogeformter Kunststoffprodukte zu steigern, wurden in der Vergangenheit verschiedene Ansätze verfolgt, wobei die qualitätsbestimmenden Ausprägungen der Eigenschaften der Formteile (z. B. Topload-Stabilität, Barriere-Eigenschaften) stets gleichbleiben oder verbessert werden müssen [Ede15, Leo11]. Die Formteileigenschaften stehen dabei jedoch häufig im Zielkonflikt mit der Senkung des Materialeinsatzes [App05, HYT+18, SFO+20]. Die Weiterentwicklungen der Maschinen-, Anlagen- sowie Werkzeugkomponenten ist im Thermoformen soweit fortgeschritten, dass der Materialeinsatz mittlerweile einen Kostenanteil von 70 - 90 % aufweist, wobei die Formteilmgewichte durch Anpassung der Wanddickenverteilung der Formteile stetig gesenkt werden [IS16, Mos13].

Thermogeformte Produkte zeichnen sich durch ihre geringe Wanddicke gegenüber bspw. spritzgegossenen Formteilen aus [HM17]. Die erwärmten Folien oder Platten werden während des Ausformprozesses mit Druckluft oder Vakuum biaxial in eine Kavität verstreckt und dünnen dadurch aus. Prozessbedingt sind die Verstreckwege jedoch unterschiedlich lang, was dazu führt, dass die Folie lokal verschieden verstreckt wird und eine ungleichmäßige Wanddickenverteilung im Formteil vorliegt. Durch die unterschiedlichen Verstreckwege liegen die Formteilmbereiche zu unterschiedlichen Zeitpunkten an der Werkzeugwand an, sodass nur noch die freiverstreckbaren, nicht anliegenden Bereiche weiter in die Kavität gedrückt werden und weiter ausdünnen. Sobald das Formteil nach der Verstreckung im Werkzeug an der Werkzeugwand anliegt, kühlt es ab und kann anschließend entformt werden [IS16, Pol93, SC16, Sch15, TB99].

Dünnstellen stellen bei thermogeformten Produkten in der Regel die qualitätsbestimmenden Bereiche dar, wodurch eine Auslegung der Formteile und die Materialauswahl hinsichtlich der dünnsten Wanddicken erfolgt. Dies hat unmittelbar eine Überdimensionierung der übrigen Formteilmbereiche zur Folge. Durch eine lastangepasste Wanddickenverteilung kann im Umkehrschluss der Materialeinsatz bei gleichbleibenden, qualitätsbestimmenden Formteileigenschaften im Vergleich zum konventionellen Prozess reduziert werden. Durch

die Verringerung des nötigen Materialeinsatzes wird zusätzlich die Energieeffizienz des gesamten Thermoformprozesses verbessert, weil weniger Material aufgeheizt und abgekühlt werden muss [IS16, Mar18, Mos13, TB99].

Neben den wirtschaftlichen Einsparpotenzialen durch den geringeren Material- sowie benötigten Energieeinsatz im Herstellungsprozess wird die Nachhaltigkeit der Formteile erhöht. Beim Transport der Formteile sowie anschließend des verpackten Gutes wird aufgrund des geringeren Gewichts weniger Kraftstoff benötigt, sodass der Kohlenstoffdioxidausstoß (CO₂) gesenkt wird.

Um die Einsparung eines Teils des eingesetzten Kunststoffmaterials zu ermöglichen, werden verschiedenen verfahrenstechnische Modifikationen des Thermoformprozesses eingesetzt. Auf ausgewählte Verfahren zur Steigerung der Materialeffizienz soll im Folgenden genauer eingegangen werden.

3 STAND DER TECHNIK UND FORSCHUNG ZUR STEIGERUNG DER MATERIALEFFIZIENZ THERMOGEFORMTER PRODUKTE

Die Ansätze zur Steigerung der Materialeffizienz können grundlegend zwei unterschiedlichen Kategorien zugeordnet werden: Zur ersten Kategorie gehören Ansätze, bei denen die optimale Ausnutzung der vorhandenen Folienfläche im Vordergrund steht. So konnte durch die Verringerung von Stegabständen zwischen den einzelnen Formteilen und verbesserte Folientransportsysteme Material eingespart werden. Die Materialeinsparmöglichkeiten dieser Kategorie sind inzwischen weit ausgeschöpft [IS16].

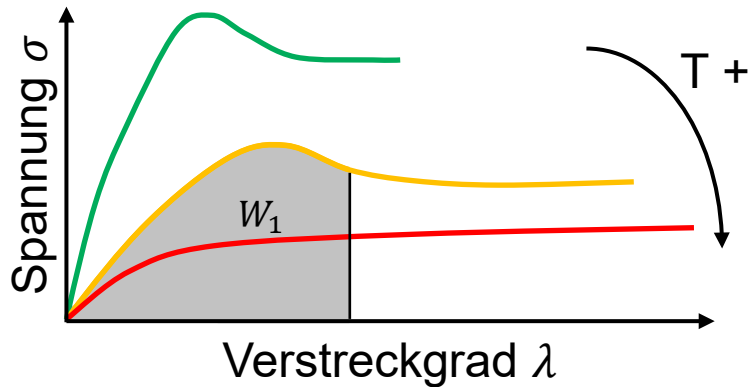
Neben der Optimierung der Werkzeugtechnik werden in einer zweiten Kategorie Verfahrensanpassungen entwickelt, die eine Verringerung der notwendigen Halbzeugdicke zum Ziel haben. Neben dem Einsatz von Vorstreckstempeln, die das Kunststoffmaterial durch Anhaftung am Vorstreckstempel gezielt lokal weniger verstrecken, ist der Einsatz von Verfahren zur Temperaturprofilierung möglich. Die Temperaturprofilierung nutzt das stark temperaturabhängige Materialverhalten von Kunststoffen aus, um durch angepasste Verstreckwiderstände der Halbzeuge die Wanddickenverteilung der Formteile zu beeinflussen [Hop17, IS16, Mar18, TB99].

Das Verformungsverhalten von Kunststoffen weist eine ausgeprägte Abhängigkeit sowohl von der Belastungsgeschwindigkeit als auch der Temperatur auf [Hop17, Mar18, MHMS11, RBH12, THG06]. Soll die Wanddickenverteilung gleichmäßig werden, müssen im konventionellen Thermoformprozess entstehende dünne Wanddickenbereiche auf dem Halbzeug kühler sein als die umliegenden Bereiche, da der Kunststoff bei niedrigeren Temperaturen einen höheren Verstreckwiderstand bzw. eine größere Dehnviskosität aufweist und somit weniger ausdünt. In Bild 3.1 ist der Verstreckprozess der Folie sowie die jeweiligen Verstreckgrade λ der Folie mit und ohne Temperaturprofilierung dargestellt. Dabei führt eine homogene Temperaturverteilung über das Halbzeug zu inhomogenen Wanddickenverteilung. Durch die Anpassung der Verstreckwiderstände bzw. der lokalen Dehnviskosität der Folie mittels Temperaturprofilierung kann die Wanddickenverteilung homogenisiert werden, sodass die Verstreckgrade am Prozessende im Formteil gleich sind [Hop17].

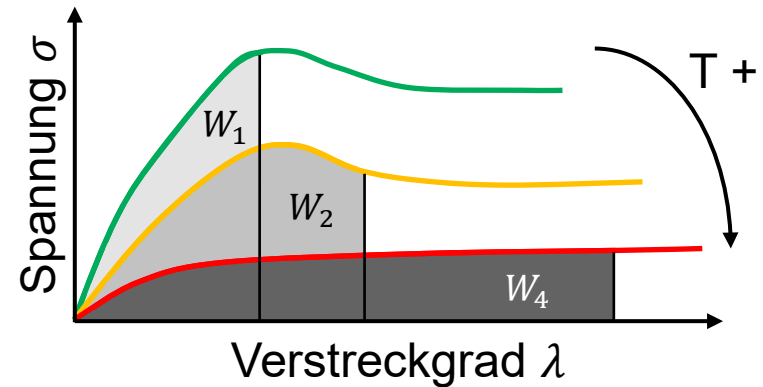
Temperaturprofile können sowohl durch die Anpassung der einzelnen Infrarotstrahlerleistungen bei der Erwärmung der Halbzeuge als auch durch Abschattungsmasken bzw. Laserstrahlung erzeugt werden [Pol93]. In unterschiedlichen Forschungsvorhaben konnte die Wirksamkeit von Temperaturprofilierungen bereits nachgewiesen werden [BCS14, CSB+13, HM16, HMB17, Mar18, NB12, NB13, NN09,

Allgemeine Funktionsweise einer Temperaturprofilierung

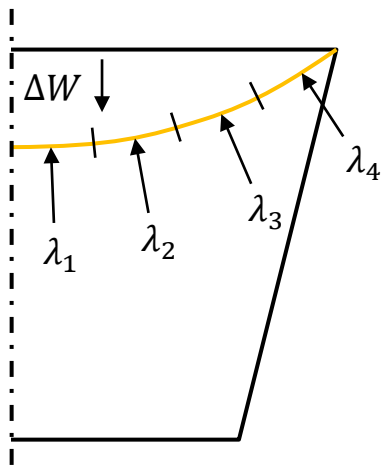
Homogene Temperaturverteilung



Inhomogene Temperaturverteilung

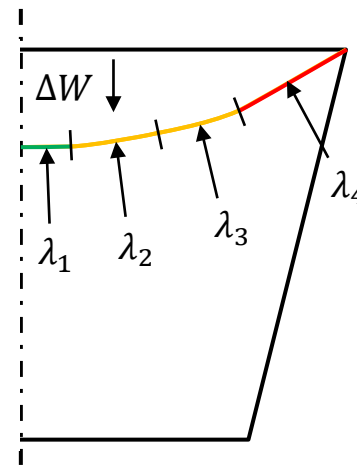


Inhomogene Verstreckung



- Halbzeugtemperaturen
 $T_1 = T_2 = T_3 = T_4$
- Verstreckgrade am Prozessende
 $\lambda_1 > \lambda_2 = \lambda_3 > \lambda_4$

Homogene Verstreckung



- Halbzeugtemperaturen
 $T_1 < T_2 = T_3 < T_4$
- Verstreckgrade am Prozessende
 $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_4$

[Hop17]

Pol93]. Je nach Verfahren wird der Energieeintrag und damit die Temperatur der Folie lokal erhöht (Laser) oder gesenkt (Abschattungsmasken), sodass unterschiedliche lokale Halbzeugtemperaturen resultieren [IS16, HMB17, Mar18, NB12, NB13, Sch15].

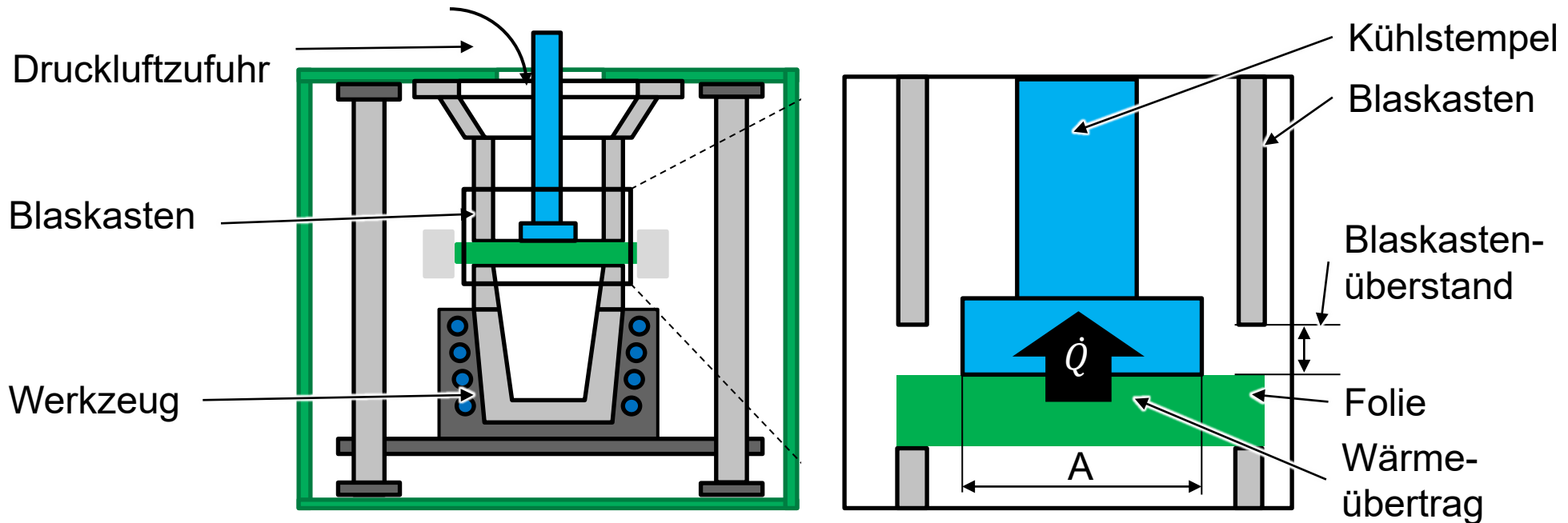
Die Anpassung der Infrarotstrahlerleistung führt jedoch nur zu geringen Temperaturunterschieden von wenigen °C sowie geringen Temperaturgradienten auf der Folie, sodass die Verstreckeigenschaften des Materials nur geringfügig anpassbar sind. Die Ausprägung der Temperaturprofile ist aufgrund der Streustrahlung somit begrenzt [DC04, FG18, Mar18].

Bei Verwendung von Abschattungsmasken wird in der Heizstation die Strahlung lokal von der Folie abgehalten. Die sich hinter der Maske befindenden Folienbereiche werden weniger stark erwärmt und weisen am Ende des Aufheizprozesses eine lokal niedrigere Folientemperatur auf. Die niedrigeren Folientemperaturen führen zu einem erhöhten Verstreckwiderstand. Je nach Ausprägung des erzeugtem Temperaturprofils auf der Folie lassen sich die Wanddickenverteilung der geformten Formteile anpassen bzw. homogenisieren [HMB17, Mar18]. Am Beispiel von thermogeformten Bechern aus Polystyrol (PS) wurde gezeigt, dass mit diesem einfach nachrüstbaren Verfahren die Wanddicke der dünnsten Stelle um etwa 45 % gesteigert werden kann [HM16]. Ein Nachteil dieses Verfahrens ist die aufwendige Ausgestaltung bzw. Positionierung des Temperaturprofils relativ zur Kavität. Darüber hinaus resultieren aufgrund des verfahrenstechnisch notwendigen Abstands zwischen den Masken und dem Halbzeug Streustrahlungen, welche die Einstellungsmöglichkeiten der Temperaturgradienten zwischen dem profilierten und dem nicht profilierten Bereich wie bei der Einstellung der Infrarotstrahlerleistungen begrenzen.

Ein weiterer Ansatz ist das Aufbringen von Temperaturprofilen durch in Kontakt tretende Heiz- oder Kühlelemente. Neben dem Einsatz von bspw. Heizkeramiken, die die Folientemperatur in definierten Bereichen lokal erhöht [NN14], ist der Einsatz einer aktiven Kühlung möglich. Die aktive Kühlung entzieht dem bereits aufgeheizten Halbzeugen lokal Wärme an definiert Halbzeugpositionen und setzt dort die Temperatur herab. Die Temperaturprofilierung erfolgt über Kontakt mit einem Temperieraggregat, womit deutlich höhere Temperaturgradienten zwischen dem profilierten und dem nicht-profilieren Bereich eingestellt werden können. Die lokale Kühlung des Halbzeugs und damit die Einstellung des Temperaturprofils geschehen erst in oder unmittelbar vor der Formstation, wodurch eine exakte Positionierung des Temperaturprofils relativ zur Kavität möglich wird. In Bild 3.2 ist der Temperierprozess mittels Kühlstempeln schematisch dargestellt. Der klassische

Funktionsweise der Temperaturprofilierung mit lokal aktiver Kühlung

Positionierung des Kühlstempels



→ Kühlstempel ersetzt Vorstreckstempel

[HBF20, HBF21]



Vorstreckstempel im Werkzeug ist einfach mit dem Kühlstempel zu ersetzen, sodass eine Temperaturprofilierung einfach umzusetzen ist.

Der vom Temperieraggregat bzw. Kühlstempel mit der Grundfläche A entzogene Wärmestrom \dot{Q} lässt sich gemäß Gl. 1 berechnen:

$$\dot{Q} = \alpha A (T_H - T_T) \quad \text{Gl. 3.1}$$

Aufgrund der Vielzahl unterschiedlicher und voneinander unabhängigen Parameter, wie z. B. der Grundfläche des Temperieraggregats, dem Werkstoff des Temperieraggregats, der Temperaturdifferenz $\Delta T = T_H - T_T$, der Flächenpressung Δp zwischen Temperieraggregat und Halbzeug (welche den Wärmeübergangskoeffizienten α beeinflusst) sowie dem zeitlichen Ablauf, lassen sich die resultierenden Temperaturprofile in einer großen Bandbreite einstellen. Die Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten ist jedoch aufgrund der vielseitigen Einflüsse wie bspw. der Temperaturdifferenz und der Flächenpressung nur schwer möglich, wodurch eine Auslegung besonders anspruchsvoll wird.

Die Anpassung des Temperaturprofils führt zu erhöhten lokalen Verstreckwiderständen, sodass die hergestellten Formteile in den Bereichen mit niedrigeren Halbzeugtemperaturen weniger verstreckt werden. So entstehen lokal dickere Wanddicken, wodurch bspw. Dünnstellen vermieden und die Materialeffizienz gesteigert werden.

Die Erprobung und Analyse der verschiedenen Einflüsse der aktiven lokalen Kühlung auf die Wanddickenverteilung der Formteile war Gegenstand dieses Forschungsvorhabens. Die lokale Kühlung wurde durch den Einsatz von Kühlstempeln ermöglicht, die die klassischen Vorstreckstempel des Thermoformprozesses ersetzen. Durch den Kontakt des erhitzten Halbzeugs mit dem gekühlten Kühlstempel wurden verschiedene Temperaturprofile erzeugt und der Einfluss auf die Wanddickenverteilung analysiert. Dazu wurden sowohl simulative als auch experimentelle Versuche durchgeführt und die Wanddickenverteilung zur Steigerung der Materialeffizienz homogenisiert.

4 ZIELSETZUNG UND LÖSUNGSWEG

Aus der in Kapitel 3 erläuterten Motivation ergibt sich die Fragestellung, inwieweit eine detaillierte Untersuchung bzw. Optimierung der aktiven Kühlung zur Homogenisierung der Wanddickenverteilung zur Steigerung der Materialeffizienz beitragen kann. Dazu wurden praktische Untersuchungen zur Erprobung der aktiven Kühlung im Thermoformen durchgeführt sowie parallel dazu eine thermische Simulation sowie eine Umformsimulation aufgebaut, auf deren Basis Prozesseinstellungen zur Anpassung der Wanddickenverteilung abgeleitet wurden. Durch die Anpassung der Versteckwiderstände der Halbzeuge war die Homogenisierung der Wanddickenverteilung möglich. Die Anpassung der Versteckwiderstände zur Homogenisierung der Formteile wurde durch verschiedene Einstellungen der Prozessparameter umgesetzt. Neben der Anpassung der Kontaktzeit zwischen Kühlstempel und Folie konnte das Temperaturprofil auch mit der Stempeltemperatur sowie durch die Positionierung des Kühlstempels im Werkzeug beeinflusst werden. Durch die Variation dieser Prozessparameter sowohl in der Simulation als auch im Experiment wurden umfangreiche Erkenntnisse zum Einsatz der aktiven Kühlung gewonnen. Insbesondere die Vergleichmäßigung der Wanddickenverteilung stand bei den Untersuchungen im Fokus.

In diesem Bericht werden die erzielten Ergebnisse des Forschungsvorhabens zur systematischen Untersuchung des Einflusses der aktiven lokalen Kühlung im Negativthermoformen erläutert. In Kapitel 5 wird die verwendete Anlagen-, Werkzeug- sowie Messtechnik beschrieben. Weiterhin erfolgt die Darstellung der Entwicklung der Temperierung der Kühlstempel sowie die Auswahl der Kühlstempelgeometrien. Im Anschluss folgt in Kapitel 6 die Erläuterung der Simulation des Thermoformprozesses mit aktiver Kühlung sowie die Darstellung der Ergebnisse der Simulationen. In Kapitel 7 werden die simulierten Wanddickenverteilungen mit den realen Wanddickenverteilung von Formteilen verglichen, die im Thermoformprozess mit Temperaturprofilierung hergestellt wurden. In Kapitel 8 werden weitere verfahrenstechnische Anpassungen, wie z. B. der Einfluss von speziellen Stempelmaterialien oder Stempelbeschichtungen dargestellt und der Einfluss auf die Wanddickenverteilung erläutert. Ebenso erfolgt die Übertragung der Erkenntnisse auf weitere Kunststoffmaterialien. Auf dieser Basis wird ein Leitfaden (Kapitel 9) zur Auslegung der Temperaturprofilierung mit aktiver Kühlung erstellt und dieser anschließend anhand der Übertragung auf eine weitere Formteilgeometrie validiert. In Kapitel 10 werden anschließend ein Fazit gezogen und ein Ausblick auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse gegeben.

5 VERWENDETE MATERIAL, ANLAGEN- UND WERKZEUGTECHNIK, METHODISCHES VORGEHEN SOWIE INBETRIEBNAHME DER KÜHLSTEMPEL

Zur Beschreibung des Vorgehens bei der Auslegung der Vorstreckstempel werden zu Beginn die verwendete Anlagen- und insbesondere die Werkzeugtechnik beschrieben, da diese auch Einfluss auf das die Stempelgeometrien aufweisen.

5.1 Verwendete Anlagen- und Werkzeugtechnik sowie Materialien

Thermoformanlage

Bei allen im Rahmen dieses Vorhabens durchgeführten Thermoformversuchen kam eine Thermoformanlage des Typs KD 20/25 der Firma Kiefel GmbH, Freilassing, zum Einsatz. Bei der Anlage handelt es sich um eine Einstationenanlage mit ausgelagerter Heizstation (Bild 3.2). In der Ober- und Unterheizung, aus denen sich die Heizstation zusammensetzt, sind jeweils zwölf Quarzstrahler vom Typ FSK mit 375 W Leistung der Firma Technical Quartz Solutions GmbH, Mainz-Kastel, verbaut [NN16]. Die Oberflächentemperatur des Halbzeugs wird von einem IR-Pyrometer im Wellenlängenbereich von 8 - 14 μm vom Typ optris CT LT der Firma Optris GmbH, Berlin, erfasst [NN14]. Zur Ausformung der Bauteile verfügt die Thermoformanlage über eine Druckluft- und Vakuumversorgung.

Temperaturmessungen

Die im Prozess eingestellten Temperaturprofile wurden mit einer IR-Kamera vom Typ A320 der Firma FLIR Systems Inc., Wilsonville, Oregon, USA, aufgezeichnet. Der Bildsensor erfasst IR-Strahlung im Spektralbereich von 7,5 - 13 μm mit einer Frequenz von 5 Hz. Für die Auswertung der IR-Aufnahmen wurde das Programm *IR Researcher* der Firma FLIR Systems verwendet [NN09]. Die von der IR-Kamera erfassten Temperaturwerte wurden mit einem Oberflächentemperaturmessgerät des Typs testo 922 der Testo SE & Co. KGaA, Lenzkirch mit angeschlossenem Oberflächenfühler vom Typ K überprüft.

Materialien

In den Untersuchungen wurden ein 0,8 mm dickes Halbzeug der Firma W.u.H. Fernholz GmbH & Co. KG, Meinerzhagen, aus 67 % hochschlagfestem Polystyrol (HIPS), 30 % Standard-Polystyrol (GPPS) und 3 % Masterbatch verarbeitet. Des weiteren wurden 0,8 mm dicke Halbzeuge aus Polypropylen (PP) und 0,9 mm dicke Halbzeuge aus amorphem Polyethylenterephthalat (aPET) untersucht. Somit wurde ein repräsentatives Spektrum an Kunststoffen abgedeckt, die bei der Herstellung von Verpackungsprodukten verwendet werden.

Werkzeug

Für die Thermoformversuche wurde ein modular aufgebautes, rotationssymmetrisches Becherwerkzeug gewählt. Dadurch konnten verschiedene Bechergeometrien abgeformt werden, die sich in Tiefe und Durchmesser unterscheiden. In Tabelle 1 sind die verschiedenen Kavitätsgrößen dargestellt. Alle Geometrien weisen einen Öffnungswinkel von 4° auf. Die Kavität mit einem Durchmesser von 60 mm und einer Tiefe von 40 mm stellt dabei die Kavität dar, mit der die Hauptuntersuchungen durchgeführt wurden.

	Durchmesser [mm]	Tiefe [mm]
Kavitäten	60	40
	80	40

Tabelle 5.1: Gewählte Kavitäts- bzw. Formteilgrößen

5.2 Auswahl der Stempelkühlung sowie ausgewählte Kühlstempelgeometrien

Die Kühlung der Kühlstempel sowie die Kühlung der Folie kann über verschiedenen Möglichkeiten erreicht werden. Zu Beginn wird auf die Auslegung des Kühlaggregats für Kühlstempel eingegangen und anschließend die Erprobung der aktiven Kühlung dargestellt.

Die Kühlung der Stempel ermöglicht es, die Temperatur der Stempel konstant zu halten. Die durch den Kontakt mit der heißen Folie eingebrachte Wärme wird aus dem Stempel abgeführt, sodass sich der Stempel mit steigender Anzahl der Formungen nicht erwärmt. Neben der klassischen Wassertemperierung ist der Einsatz von Kohlenstoffdioxid (CO₂) möglich. In konstruktiv aufwendigeren Umsetzungen ist auch der Einsatz von Wärmeleitrohren denkbar. Bei der CO₂-Kühlung wird komprimiertes CO₂ durch den Kühlstempel geleitet. Durch die Expansion des CO₂ wird der Umgebung Wärme entzogen und der Kühlstempel abgekühlt. Die Kühlung mit einer Wassertemperierung (teco cw 25e.1, gwk Gesellschaft Wärme Kältetechnik mbH, Meinerzhagen) wurde ebenfalls untersucht, ergab jedoch bei gleicher Stempeltemperatur keine Unterschiede in der Ausprägung der Temperaturprofile bzw. der resultierenden Wanddickenverteilungen. Auf Basis des im Blaskasten bzw. Werkzeug zur Verfügung stehenden Platzbedarfs sowie aufgrund der häufigen Kühlstempelwechsel, bei denen Wasser bei der Demontage austrat, wurde in Absprache mit dem projektbegleitenden Ausschuss der alleinige Einsatz der mit CO₂ gekühlten Stempel festgelegt. Die Erprobung der aktiven Kühlung im Thermoformen mittels CO₂-gekühlten Stempeln konnte so erfolgreich durchgeführt werden. Die weiteren Versuche wurden alle mit der CO₂-Temperierung durchgeführt, sodass im Folgenden nicht weiter darauf eingegangen wird.

Die Wärmeübertragung von der Folie in den Stempel kann durch verschiedene Prinzipien umgesetzt werden. Neben der Konvektionskühlung ist die Kontaktkühlung die Variante, die zu ausgeprägten Temperaturgradienten in einer für den Thermoformprozess akzeptablen Kontaktzeit von weniger als 0,2 s führt. Ohne Kontakt zwischen Folie und Kühlstempel hingegen ist die Ausprägung des Temperaturprofils zwar möglich, benötigt jedoch vergleichsweise viel Zeit um ausgeprägte Temperaturprofile zu erzeugen, sodass eine wirtschaftliche Fertigung von bspw. Verpackungsprodukten, bei deren Herstellung schnelle Taktzeiten gefordert werden, nicht möglich ist. Eine Erhöhung der Wärmeübertragung zwischen Kühlstempel und Werkzeug konnte des Weiteren durch ein Ansaugen der Folie an Stempel erzeugt werden.

Die Kühlstempelgeometrien wurden in Anlehnung an die zu beschattenden Bereiche aus *Martens* gewählt [Mar18]. Die Untersuchungen in [Mar18] zeigen, dass bei der gewählten Formteilgeometrie mit einem Durchmesser von 60 mm sowie einer Tiefe von 40 mm eine gleichmäßige Wanddickenverteilung erzeugt wird, wenn eine Zone mit einer verringerten Halbzeugtemperatur mit einem Durchmesser von 40 mm konzentrisch zu Folienmitte erzeugt wird. Da jedoch andere Temperaturgradienten durch die aktive Kühlung gegenüber der Abschattung mit Masken auf der Folie zu erwarten sind, wurden weitere Kühlstempelgeometrien untersucht, um eine Anpassung der Temperaturprofile zu ermöglichen. Es wurden sowohl Kühlstempel als Vollzylinder aus Aluminium ohne und mit Verrundungsradien als auch Ringzylinder gefertigt. Im Folgenden beschreiben die Angaben der Kühlstempeldurchmesser immer den Nenndurchmesser. Werden Verrundungsradien vorgesehen, die die Erstkontaktfläche des Kühlstempels mit der Folie verringern, werden die verwendeten Radien explizit genannt. Die verschiedenen Abmaße der Stempel können Bild 5.1 entnommen werden. Zusätzlich wurden ausgewählte Stempel aus Kupfer gefertigt und Aluminium-Stempel mit einer PTFE-Beschichtung versehen, um den Einfluss der Wärmeleitfähigkeit des Stempelmateriale sowie der Kühlstempeloberfläche auf die Ausformung der Formteile zu analysieren. Auf die detaillierten Ergebnisse der Einflüsse der Stempelgeometrie sowie den Einfluss der verschiedenen Mechanismen der Wärmeübertragung auf das Temperaturprofil der Folien wird im Verlauf der Erprobung der aktiven Kühlung im Thermoformen genauer eingegangen (Kapitel 6 und Kapitel 8).

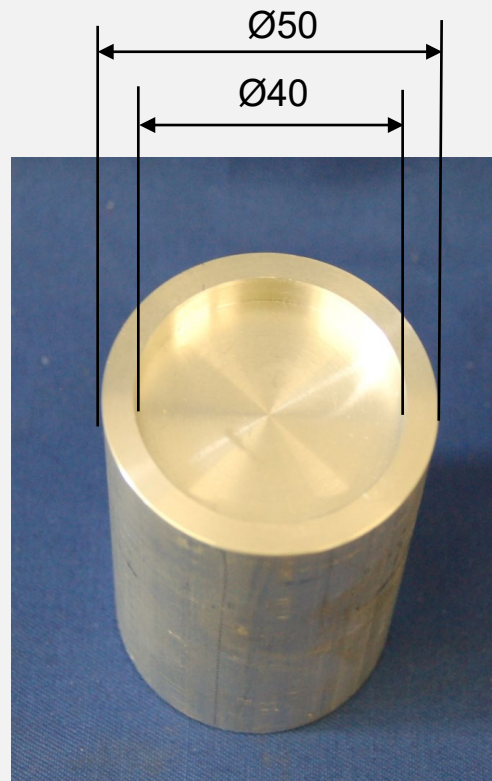
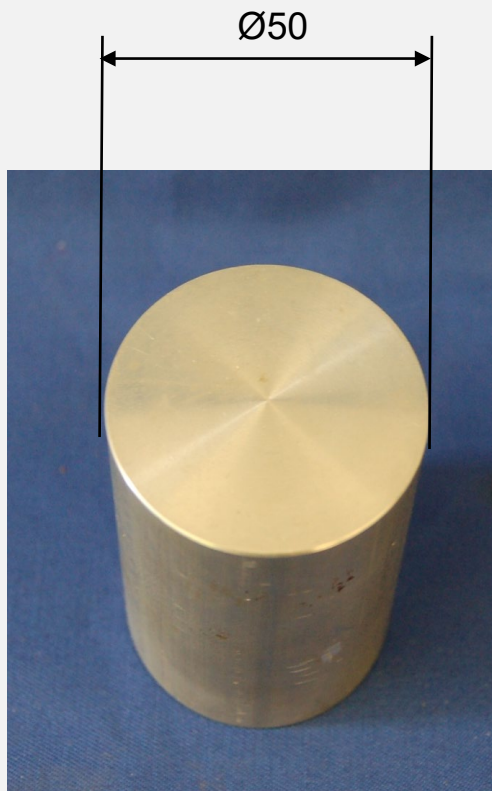
5.3 Darstellung der Ergebnisse

Die Darstellung der Temperaturprofile erfolgt anhand von Thermografieaufnahmen. Weiterhin werden die Temperaturprofile sowie die resultierenden Wanddickenverteilungen auch in Liniendiagrammen dargestellt. Die lokalen Temperaturen bzw. die lokalen Formteilmwanddicken werden über den gesamten Querschnitt der Folie bzw. des Formteils

Beispielhafte Kühlstempelgeometrien

Vollzylinder
ohne Verrundung

Ringzylinder
ohne Verrundung



Geometrievariationen

- Vollzylinder:
 - Durchmesser in mm:
30 / 32,5 / 35 / 37,5 / 40 / 42,5 / 45
 - Jeweils mit Verrundung in mm:
0 (keine Verrundung) / 3 / 6
- Ringzylinder:
 - Durchmesser in mm:
30 / 32,5 / 35 / 37,5 / 40 / 42,5 / 45
 - Ringbreite in mm:
2,5 / 5 / 7,5
- PTFE-Beschichtung ausgewählter Stempel zur Beeinflussung der Kontaktbedingung



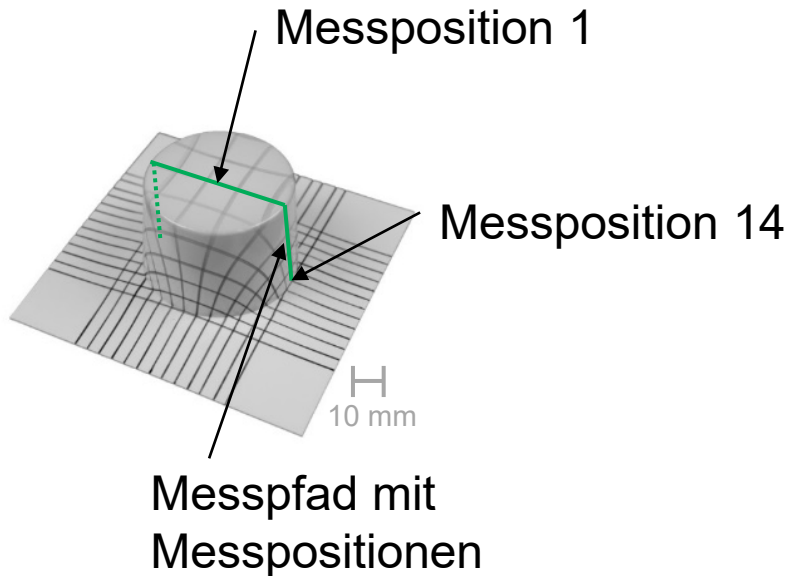
vermessen. Anschließend erfolgt die Mittelung der jeweils gegenüberliegenden Werte auf der rechten und linken Formteilhälfte. Zur besseren Übersichtlichkeit werden die gemittelten Werte anhand von einer Folien- bzw. Formteilhälfte dargestellt. In Bild 5.2 ist die Wanddickenverteilung eines thermogeformten Becherformteils dargestellt, das ohne Temperaturprofilierung nur mit Formluft geformt wurde. Messposition (MP) 1 befindet sich in der Mitte des Becherbodens und Messposition 14 am oberen Rand des Bechers nahe der Öffnung. Besonders deutlich ist im Übergangsbereich zwischen Becherwand und Becherboden die Dünnstelle zu erkennen, die mit einer Wanddicke unter 0,1 mm besonders stark ausgedünnt wurde. Diese Dünnstelle gilt es durch den Einsatz der Temperaturprofilierung zu vermeiden. Zur Vermessung der Wanddicken wird ein Magna Mike 8600 der Firma Olympus GmbH, Hamburg verwendet [NN15].

5.4 Methodisches Vorgehen

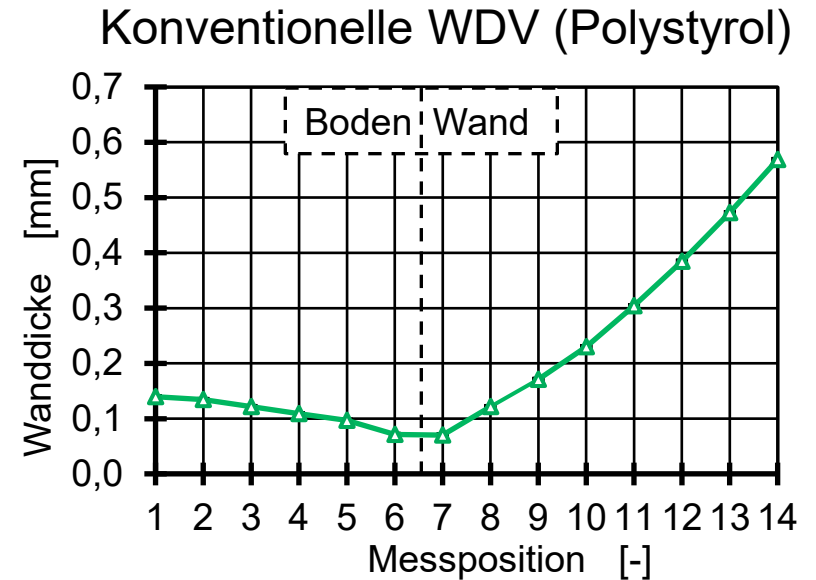
Zur Erprobung der aktiven Kühlung im Thermoformen wurde als Ziel festgelegt, dass die Profilierung möglichst ohne eine Zykluszeitverlängerung durchgeführt werden soll, da der Zykluszeit insbesondere bei Verpackungsprodukten eine große Bedeutung zu kommt. So werden Vorversuche ohne eine Verlängerung der Zykluszeit durchgeführt. Das genaue Vorgehen wird in Kapitel 6 beschrieben. Sollte eine Temperaturprofilierung ohne die Verlängerung der Zykluszeit möglich sein, werden anschließend Optimierungen der Stempel bezüglich Geometrie und Material durchgeführt. Ist eine Temperaturprofilierung ohne die Verlängerung der Zykluszeit nicht möglich so wird eine Simulation aufgebaut, um die nötigen Prozessparameter zur Erzeugung ausreichend ausgeprägter Temperaturprofile zur Anpassung der Wanddickenverteilung zu bestimmen (Kapitel 7). Auch bei dieser Bestimmung steht eine minimale Verlängerung der Zykluszeit im Fokus. Auf Basis der Simulationsergebnisse werden weitere experimentelle Untersuchungen durchgeführt (Kapitel 8) und die Ergebnisse von den Simulationen sowie Experimenten in einem Leitfaden zusammengefasst. Anschließend erfolgt die Validierung des Leitfadens anhand von anderen Formteilgeometrien sowie Folienmaterialien (Kapitel 9).

Darstellung der Ergebnisse am Beispiel eines Becherformteils

Messpfad und Messpositionen



Darstellung der Wanddickenverteilung



6 ERPROBUNG DES THERMOFORMENS MITTELS LOKALER AKTIVER KÜHLUNG

Der Einfluss der Stempelverstreckung auf die Wanddickenverteilung hängt von vielen verschiedenen Prozessgrößen ab. Neben der Geometrie des Kühlstempels haben weitere Faktoren einen Einfluss auf die resultierenden Temperaturprofile. Neben der Kontaktbedingung, die den Wärmeübergangskoeffizienten zwischen Halbzeug und Stempel beeinflusst, ergeben Änderungen der Foliendicke und -temperatur, der Kühlstempeltemperatur sowie der Kontaktzeit verschiedene Temperaturprofile. Der Kühlstempel ersetzt den klassischen Vorstreckstempel im Blaskasten (vgl. Bild 3.2). Teile dieses Kapitels sind bereits in [HBF20] und [HBF21] veröffentlicht worden.

Da alle genannten Faktoren Einflüsse auf die resultierende Wanddickenverteilung aufweisen, wurde der Fokus zu Beginn auf den Einfluss der Kühlstempelgeometrie bei möglichst geringer Zykluszeit gelegt, da dies von besonderer Bedeutung bei der Herstellung von Verpackungsprodukten ist. Auf eine Verzögerungszeit zur Erhöhung der Kontaktzeit vor dem Zuschalten der Formluft wurde daher bei der Erprobung zu Beginn verzichtet, um eine Verlängerung der Zykluszeit zu vermeiden sowie zu prüfen, ob die sich einstellende kurze Kontaktzeit zwischen Kühlstempel und Folie bereits zur Erzeugung eines Temperaturprofils ausreichend ist. Die Umformung der Folie mittels Formluft begann somit direkt, nachdem der Untertisch hochgefahren war und die Folie zwischen Blaskasten und Werkzeug eingeklemmt wurde. Das sofortige Zuschalten der Formluft entspricht im Folgenden einer Kontaktzeit von 0 s. Die weiteren Prozesseinstellungen zur Erprobung der aktiven Kühlung sind in Tabelle 1 dokumentiert:

Parameter	Einheit	Parameterhöhe
Stempeldurchmesser (Vollmaterial, ohne Radius)	[mm]	35, 40, 45
Stempeltemperatur	[°C]	20, 10, 0
Folientemperatur	[°C]	120
Überstand des Kühlstempels über Blaskasten	[mm]	0, 4, 8
Kontaktzeit	[s]	0
Druck der Formluft	[bar]	5
Dauer Formluft	[s]	3

Tabelle 6.1: Eingesetzte Stempelgeometrien und Prozessparameter [HBF20]

Die verwendeten Stempel wiesen im Kontaktbereich der Folie einen Nenndurchmesser von 35, 40 und 45 mm ohne Verrundungsradius auf. Da die Temperaturprofilierung im geschlossenen Werkzeug erfolgte, musste das Werkzeug zur Aufnahme der Bilder geöffnet und der Spanrahmen mit der Folie in den Aufnahmebereich der Kamera verfahren werden. Diese vergangene Zeit vom Kontakt der Folie mit dem Stempel bis zur Aufnahme betrug zwei Sekunden.

6.1 Einfluss der Stempelgeometrie und -temperatur auf die resultierenden Halbzeugtemperaturprofile ohne Verzögerungszeit

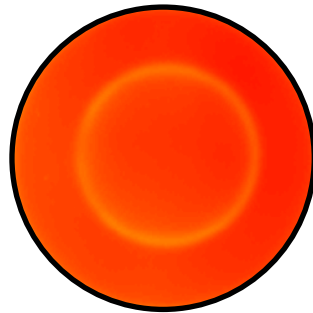
Zur Analyse der lokal aktiven Kühlung mittels Kühlstempelkontakt wurden die resultierenden Halbzeugtemperaturen auf der Folie erfasst, um die gewählten Prozesseinstellungen in Hinblick auf die erzeugten Temperaturprofile und deren Ausprägung zu bewerten. Die jeweiligen zugehörigen Wanddickenverteilungen werden anschließend an die Beschreibung der Temperaturprofile dargestellt und erläutert.

In Bild 6.1 ist der Einfluss der verschiedenen Stempelgeometrien bei einer Stempeltemperatur von 20 °C und 0 Sekunden Kontaktzeit auf das resultierende Temperaturprofil dargestellt. Zu erkennen ist, dass Temperaturprofile durch den Kontakt mit dem Kühlstempel entstehen, aber nicht stark ausgeprägt sind. Bei einem Stempeldurchmesser von 35 mm war eine minimale Temperaturänderung von nur wenigen Grad Celsius zu erkennen. Der Temperaturunterschied der gekühlten Bereiche zur Folientemperatur von 120 °C betrug lediglich 6 °C. Bei einem Durchmesser von 40 und 45 mm verschoben sich die Kreisprofile nach außen, wodurch gezeigt wurde, dass mittels Änderung der Stempelgeometrie verschiedene Folienbereiche gekühlt werden können. Die Temperaturunterschiede, die sich über der Folie einstellten, unterschieden sich von Stempel zu Stempel jedoch kaum. Bei Kühlstempeldurchmessern von 40 mm bzw. 45 mm stellten sich mittlere Temperaturdifferenzen von 5 °C und 7 °C ein, die somit einem ähnlichen Bereich wie beim Stempeldurchmesser mit 35 mm lagen [HBF20]. Zur Homogenisierung der Wanddickenverteilung wurde in der Dissertation *Martens* eine Temperaturdifferenz zwischen 8 °C und 12 °C benötigt [Mar18].

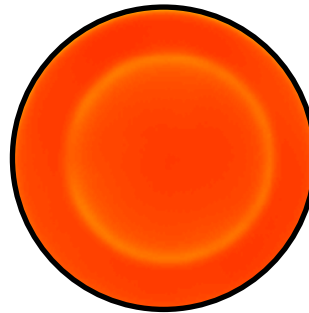
Auffällig ist jedoch, dass bei allen Temperaturprofilen nur ein Kreisring resultiert, obwohl die verwendeten Kühlstempel aus Vollmaterial gefertigt sind. Die Kreisringbildung kann durch den gravitationsbedingten Foliendurchhang erklärt werden, der bei einem kurzen Stempelkontakt ohne Verzögerungszeit zur Formluftluftzuschaltung dazu führt, dass nur die Außenbereiche der Kühlstempel mit der Folie in Kontakt stehen. Die Folge ist, dass der innere Bereich des Stempels der Folie kaum Wärme entzieht und diese inneren Bereiche direkt unter dem Stempel, die nicht in direktem Kontakt mit der Folie stehen, weniger stark gekühlt werden. Die Temperaturprofile wurden weiterhin nach unterschiedlichen Zeiten von

Resultierende Temperaturprofile bei Einsatz verschiedener Stempelgeometrien und einer Stempeltemperatur von 20 °C

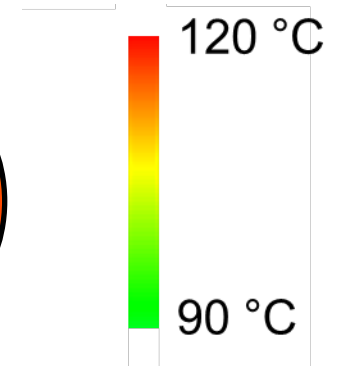
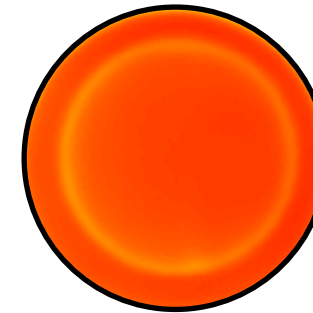
Stempeldurchmesser: 35 mm
(Vollmaterial)



40 mm



45 mm



Folienmaterial: Polystyrol
Folientemperatur: 120 °C
Stempeltemperatur: 20 °C
Verzögerungszeit: 0 s
Messmethode: Infrarotkamera

[HBF20, HBF21]

2, 4 und 6 s bis zur Aufnahme der IR-Bilder vermessen. Bei längeren Messintervallen konnte festgestellt werden, dass die Vollprofile der Kühlstempel auch innerhalb der in den IR-Bildern zu erkennenden gekühlten ringförmigen Zone Temperaturunterschiede erzeugen. Aufgrund der vergleichsweise langsamen Wärmeleitung durch die Folie sind die Zeiten bis zur Ausbildung der für eine Wanddickenoptimierung notwendigen Temperaturprofile so lang, sodass eine industrielle Anwendung aufgrund der zu erwartenden hohen Zykluszeit auszuschließen ist. Daher werden diese Ergebnisse hier nicht gesondert dargestellt [HBF20].

Um niedrigere Temperaturen in den gekühlten Bereichen der Folie bei gleichbleibender Zykluszeit zu erzeugen, muss somit die Kühlstempeltemperatur abgesenkt werden. Wie in Bild 6.2 dargestellt, führt ein Absenken der Stempeltemperatur in den in Kontakt stehenden Bereichen zu stärkeren Temperaturunterschieden. Temperaturunterschiede von bis zu 10 °C werden auf der Folie durch ein Absenken der Stempeltemperatur auf 0 °C erzeugt. Im Schnitt erhöht sich die Temperaturdifferenz bei einer Kühlstempeltemperatur von 0 °C jedoch nur um ca. 2,1 °C im Vergleich zur Kühlstempeltemperatur von 20 °C. Die Positionen der entstehenden Kühlringe unterscheidet sich entsprechend den Stempeldurchmessern analog zu Bild 6.1. Weitere Stempeltemperaturen die zwischen, 0 °C und 20 °C liegen, führen zu Ausprägungen der Temperaturprofile, die zwischen den beiden gezeigten Resultaten liegen [HBF20]. Durch die Senkung der Stempeltemperatur konnte die Folientemperatur somit der in *Martens* benötigten Temperatur von ca. 10 °C angenähert werden.

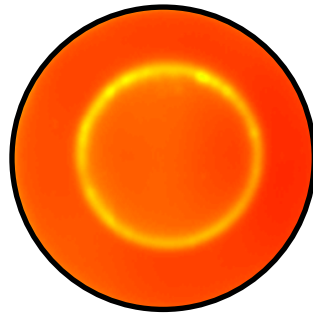
6.2 Resultierende Wanddickenverteilung nach lokaler Kühlung der Folie ohne Verzögerungszeit

Nach der Untersuchung des Einflusses der Kühlstempelgeometrie und der -temperatur auf das Temperaturprofil des Halbzeuges wurde im nächsten Schritt die Wanddickenverteilung untersucht. Damit sollte überprüft werden, ob die Temperaturunterschiede von bis zu 10 °C bereits ausreichend sind, um die Wanddickenverteilung wie bei *Martens* zu beeinflussen.

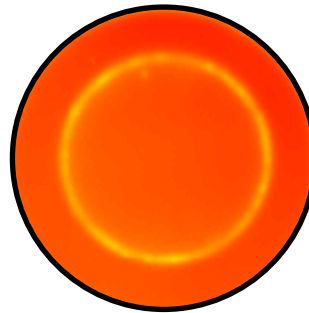
Die resultierenden Wanddickenverläufe beim Einsatz der Temperaturprofilierung mittels aktiver lokaler Kühlung sind in Bild 6.3, links, am Beispiel der Kühlstempeltemperatur von 20 °C bei verschiedenen Stempeldurchmessern dargestellt. Die Darstellung zeigt, dass keine starke Änderung der Wanddickenverteilung der mit Temperaturprofilierung geformten Formteile vorliegt. Der Verlauf der Wanddickenverteilung vom Becherboden in der Mitte mit einer Dicke von 0,15 mm über den kritischen Bereich zwischen MP 6 und 7 bis (< 0,1 mm) hin zum Becherrand (MP14) entspricht dem in Bild 5.2 dargestellten Verlauf der konventionellen Prozessführung ohne Vorstreckhilfen. Lediglich im Bereich von MP 13 ist eine geringfügige Änderung im Kontaktbereich zu erkennen, die jedoch großen Schwankungen unterliegt. Dass kaum Unterschiede auftreten, kann auf verschiedene Ursachen zurückgeführt

Resultierende Temperaturprofile bei Einsatz verschiedener Stempelgeometrien und einer Stempeltemperatur von 0 °C

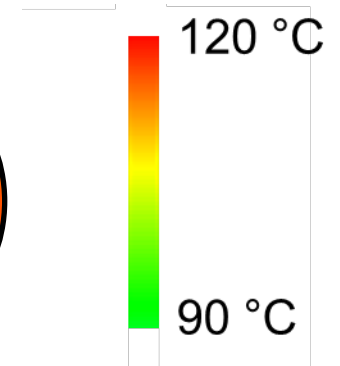
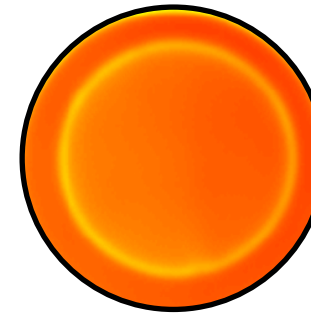
Stempeldurchmesser: 35 mm
(Vollmaterial)



40 mm



45 mm



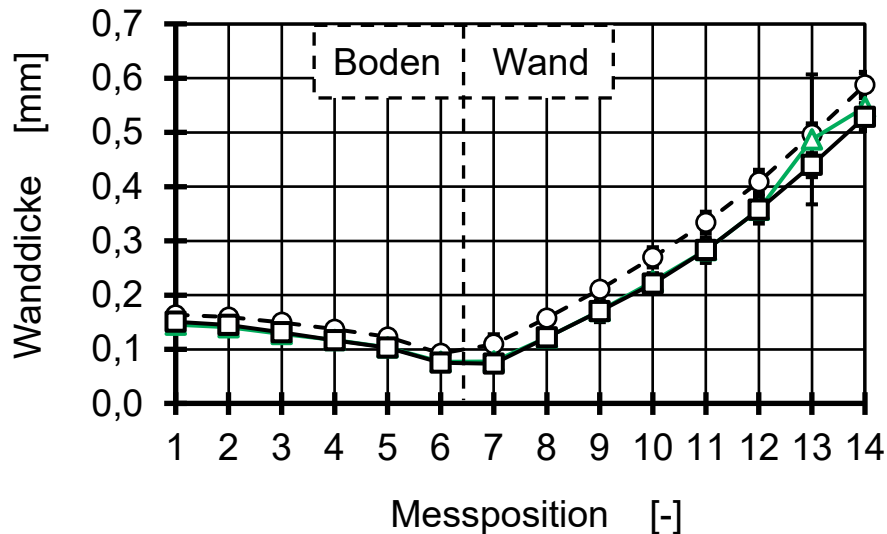
Folienmaterial: Polystyrol
Folientemperatur: 120 °C
Stempeltemperatur: 0 °C
Verzögerungszeit: 0 s
Messmethode: Infrarotkamera

[HBF20, HBF21]

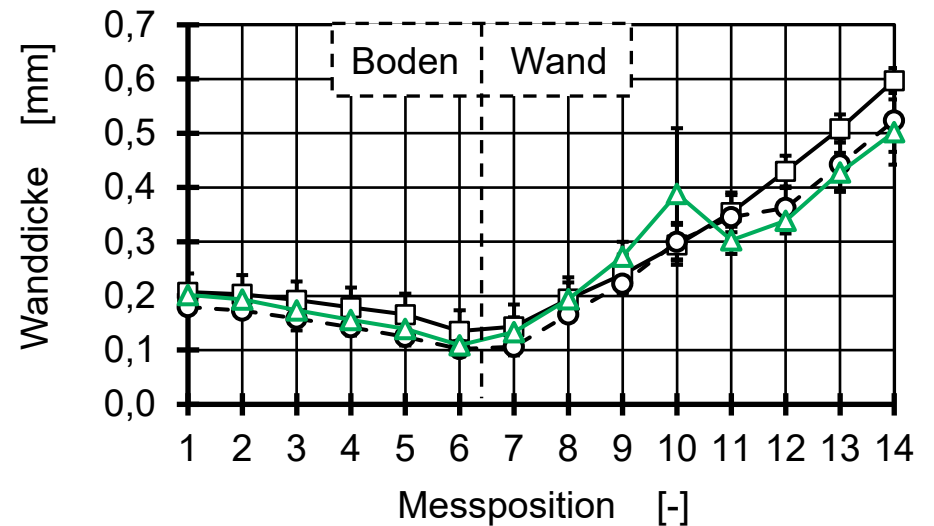
Wanddickenverteilung bei Verwendung verschiedenen Stempeldurchmessern, -temperaturen sowie -positionen

Material: PS, Folientemperatur: 120 °C

Stempeldurchmesser:
 -■- 45 mm
 -▲- 40 mm
 -○- 35 mm
 Stempeltemperatur: 20 °C (konstant)



Stempeldurchmesser: 40 mm
 Stempelüberstand:
 -■- 0 mm
 -○- 4 mm
 -▲- 8 mm
 Stempeltemperatur: 0 °C (konstant)



[HBF21]

werden. Zum einen muss zur Aufnahme der IR-Bilder und deren Interpretation der zeitliche Versatz zwischen Kühlung und Aufnahme berücksichtigt werden. Diese Zeit beträgt in etwa 2 Sekunden. Daher ist davon auszugehen, dass bei Formung der Becher das Temperaturprofil nicht ausreichend ausgebildet ist, weil eine Kontaktzeit zum Abführen von mehr Wärme aus der Folie in den Kühlstempel fehlt. Die resultierenden Temperaturunterschiede sind daher zu gering bzw. nicht ausreichend über der Foliendicke ausgeprägt. Die Temperatenausgleichsvorgänge bzw. die Wärmeleitung über der Foliendicke benötigen somit zu lange, um einen signifikanten Beitrag zur Änderung der Verstreckwiderstände der Folie beizutragen. Die Temperaturprofilierungen ohne eine verlängerte Kontaktzeit führen daher zu einer vergleichbaren Wanddickenverteilung wie bei der konventionellen Prozessführung. Die in Bild 6.2 dargestellten Temperaturprofile, die mit einer Stempeltemperatur von 0 °C erzeugt werden, führen zu ähnlichen, nicht nennenswerten Unterschieden in der Wanddickenverteilung. Daher werden diese nicht erneut dargestellt [HBF20]. Zur Abschätzung der benötigten Kontaktzeiten werden diese mit einem 1-D-Wärmeübergang berechnet. Bei einer einseitigen Kühlung und einer Zieltemperaturdifferenz von 10 bis 15 °C ergeben sich Kontaktzeiten von ca. 0,1 bis 0,3 s. Die Änderung der Kontaktzeiten wurde vor dem Einstellen einer Verzögerungszeit zum Zuschalten der Formluft, die die Zykluszeit verlängert, durch eine Veränderung der Stempelposition im Werkzeug erzeugt. Die Einflüsse werden im Folgenden dargestellt.

6.3 Beeinflussung der Temperaturprofile durch Änderung der Kühlstempelposition

Wie beschrieben muss die Kontaktzeit zwischen Kühlstempel und Folie erhöht werden, um eine ausgeprägtere Temperaturprofilierung zu ermöglichen. Gleichzeitig soll die Gesamtzykluszeit weiterhin nicht erhöht werden. Die Umsetzung der Verlängerung der Kontaktzeit zwischen Kühlstempel und Folie erfolgte dadurch, dass der Kühlstempel nicht wie bisher bei 0 mm Überstand im Vergleich zum Blaskasten positioniert wird (vgl. Bild 3.2). Durch das Überstehen des Kühlstempels erfolgt beim Zufahren des Werkzeugs ein früherer Kontakt des Stempels mit der Folie. Der Kontakt bleibt solange bestehen, bis das Werkzeug geschlossen ist. Anschließend erfolgt wie zuvor die Umformung mittels Druckluft bei einer Kontaktzeit von 0 s [HBF20].

Der Einfluss des Kühlstempelüberstands von 4 bzw. 8 mm auf die resultierenden Temperaturprofile wird am Beispiel eines Stempels mit 40 mm Durchmesser und einer Stempeltemperatur von 0 °C in Bild 6.4 dargestellt: Auch bei dieser Prozesseinstellung waren die resultierenden Unterschiede in den lokalen Temperaturen auf der Folie nur sehr gering und wiesen nur geringe Unterschiede zu den Temperaturen ohne Stempelüberstand auf. Allerdings wurde die Temperatur durch die Stempelüberstandserhöhung von 4 mm auf 8 mm

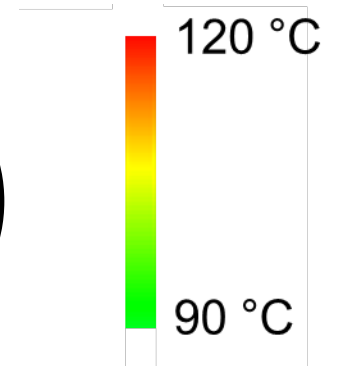
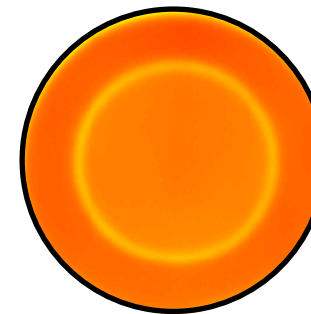
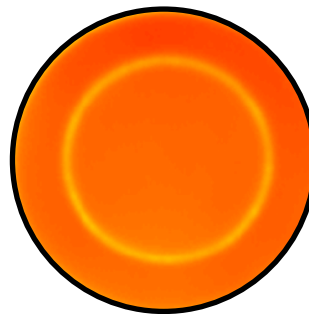
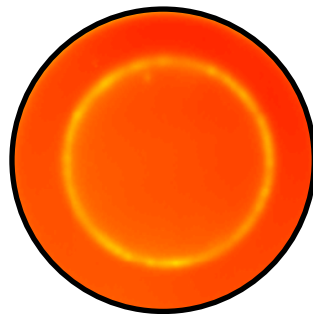
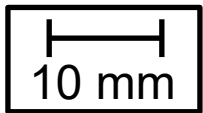
Darstellung der resultierenden Temperaturprofile beim Einsatz eines Kühlstempelüberstandes von 4 bzw. 8 mm

Stempelüberstand:
(Vollmaterial)

0 mm

4 mm

8 mm



Stempel: Ø40 mm
Folienmaterial: Polystyrol
Folientemperatur: 120 °C
Stempeltemperatur: 0 °C
Verzögerungszeit: 0 s
Messmethode: Infrarotkamera

[HBF20, HBF21]



weiter abgesenkt. Bei 4 mm wurde eine Temperaturdifferenz von ca. 3 °C erreicht, während es bei 8 mm Stempelüberstand ca. 6,6 °C waren [HBF20].

Zu erkennen ist weiterhin der Temperaturunterschied über den Kreisring selbst. In Bild 6.2, Mitte und links, und Bild 6.4, links, sind diese Unterschiede zu erkennen. Die Kreisringe sind nicht deutlich von den heißeren, umliegenden Bereichen abgetrennt und weisen Inhomogenitäten im gekühlten Bereich selbst auf. Der Temperaturunterschied zur Ausgangsfolientemperatur von 120 °C zwischen einem Stempelüberstand von 0 mm war im Schnitt mit ca. 9,6 °C weiterhin deutlich größer als bei einem Überstand von 8 mm, bei dem sich eine Temperaturdifferenz von 6,6 °C ergab. Der geringere Temperaturunterschied ist widersprüchlich, weil bei einem Stempelüberstand von 8 mm die Kontaktzeit höher ist. Der Stempelkontakt trat im Prozess daher früher ein. Somit sollte das Temperaturprofil stärker ausgeprägt sein. Sowohl die Temperaturdifferenzen bei unterschiedlichen Stempelüberständen als auch die Temperaturunterschiede innerhalb eines Kreisrings sind dadurch zu begründen, dass beim Einsatz einer Stempeltemperatur von 0 °C die Umgebungsfeuchte am Stempel gefriert. Das am Stempel entstandene Eis führte somit zu unterschiedlichen Wärmeübergangsbedingungen und zu Temperaturdifferenzen über dem Ringprofil selbst, aufgrund von zufälliger und lokal ungleichmäßiger Eisbildungszonen. Die unterschiedlichen Temperaturdifferenzen ließen sich auf lokal veränderte Kontaktbedingungen durch die unterschiedlich starken Eisbildungszonen zurückführen. Gleiches galt für eine Stempeltemperatur von 10 °C, bei der Wasser am Stempel kondensierte. Eine Temperierung der Kühlstempel auf 10 °C oder weniger ist in klassischen Produktionsumgebungen daher nicht praktikabel und muss somit in Frage gestellt werden [HBF20].

In Bild 6.3, rechts, sind die zugehörigen Wanddickenverteilungen dargestellt, die aus den beschriebenen Prozesseinstellungen mit Stempelüberstand und dem gewählten Stempeldurchmesser von 40 mm resultieren. Die resultierenden Wanddickenverteilungen wurden auch durch die Prozesseinstellungen mit Stempelüberständen nur wenig beeinflusst. Der Gesamtverlauf ändert sich daher nur geringfügig. Allerdings ist auffällig, dass im Vergleich zu den Prozesseinstellungen (Stempeltemperatur 20 °C, Stempelüberstand 0 mm) und den in Bild 6.3, links, dargestellten Wanddickenverteilungen bereits eine leichte Erhöhung der Wanddicken im Übergang vom Boden- zum Wandbereich (MP 6 und 7) erreicht werden kann. Alle Wanddicken in diesem Bereich liegen im Mittel über 0,1 mm und damit über den zuvor resultierenden Wanddicken im Bereich von MP 6 und 7. Weiterhin ist eine Änderung der Wanddicke im Bereich von MP 10 bei einem Stempelvorstand von 8 mm zu erkennen. Die Änderung zeigt, dass ein verlängerter Folienkontakt durch den Stempelvorstand zu einer ausgeprägteren Temperaturprofilierung und somit höheren

Verstreckwiderständen der Folie führte, wodurch die Folie weniger stark in diesem Bereich verstreckt wurde. Die Wanddickenverteilung konnte somit beeinflusst werden. Allerdings war die Kontaktzeit noch immer nicht ausreichend hoch, um signifikante Veränderungen des gesamten Wanddickenverlaufs zu erzeugen. Aus diesem Grund musste für weitere Untersuchungen die Kontaktzeit erhöht werden. Die Erhöhung der Kontaktzeit durch die Überstand des Stempels und das weitere Absenken der Stempeltemperatur waren somit nicht ausreichend, sodass auf eine Verzögerungszeit bis zum Zuschalten der Formluft zurückgegriffen werden musste, was sich jedoch in einer Erhöhung der gesamten Zykluszeit äußert [HBF20]. Eine Steigerung der Materialeffizienz ist jedoch aus wirtschaftlicher Sicht sowie aus Gründen der Nachhaltigkeit auch mit einer Verlängerung der Zykluszeit als sinnvoll zu erachten. Insbesondere durch die steigenden Materialkosten, die beim Thermoformen bis zu 90 % der Herstellungskosten des Formteils ausmachen, ist eine langsamere materialeffiziente Herstellung unabdingbar, sodass es wirtschaftlich Sinn ergibt Herstellungsprozesse mit einer leicht verlängerten Zykluszeit einzusetzen [Mos13, WL19].

Um die Auslegung der Kühlstempelgeometrie sowie die Bestimmung der vielfältigen Prozessparameter (bspw. Stempel- sowie Folientemperaturen, Kontaktzeiten) zu vereinfachen, wurde parallel zur Erprobung der aktiven Kühlung durch Experimente eine Simulationsroutine aufgebaut, die die Simulationen des Kühlprozesses der Folie durch den Kühlstempel sowie die anschließende Umformung der Folie simuliert. So kann gegenüber zeitaufwendigen und kostenintensiven experimentellen Versuchen ein großer Versuchsraum in kurzer Zeit simulativ abgedeckt und der Einfluss verschiedener Prozesseinstellung auf das Temperaturprofil und anschließend auf die Wanddickenverteilung ermittelt werden. Weiterhin ist eine Adaption auf komplexere Formteilgeometrien möglich, bei denen die Auslegung von größeren bzw. komplexeren Temperaturprofilen und der dazu benötigten Kühlstempelgeometrien nicht wirtschaftlich experimentell zu ermitteln ist. Der Aufbau der Simulation zur Berechnung der Temperaturprofile und Wanddickenverteilungen sowie die Ergebnisse werden im Folgenden dargestellt.

7 SIMULATION DES THERMOFORMPROZESSES MIT LOKALER AKTIVER KÜHLUNG

Um die Auslegung der Kühlstempelgeometrie und die Bestimmung der Prozessparameter zu vereinfachen, werden Simulationen eingesetzt. Die Prozessschritte des Kühlens und des Umformens wurden getrennt voneinander betrachtet und anschließend gekoppelt. Zu Beginn dieses Kapitels wird der Aufbau und Ablauf der Simulation beschrieben, die von der Folienkühlung bis zur Umformung durchgeführt wurde. Es werden die verwendeten Randbedingungen, Prozessführungen, Modellierung der Geometrien und die Materialmodellierung der Dehnviskosität beschrieben. Der Aufbau der Simulation wurde durch die Bachelorarbeit von *Papalla* unterstützt [Pap21].

7.1 Aufbau der Simulationen

Die Simulation der Temperaturprofilierung im Thermoformen mittels aktiver Kühlung wurde mit Abaqus, der Dassault Systemes Simulia Corp., Providence RI, USA, aufgebaut. Der Aufbau der Heizsimulation wurde in Absprache mit dem projektbegleitenden Ausschuss nicht mit einer Strahlungssimulation abgebildet, da die Simulationsgüte durch die Vorgabe von real vorliegenden Temperaturen deutlich erhöht werden kann. Die Fehlerfortpflanzung durch verschiedene aufeinander aufbauende Simulationen kann so minimiert werden. Zum einen ist die Vorgabe einer homogenen Folientemperatur in der Simulation vor dem Beginn der aktiven Kühlung möglich und zum anderen können mittels Thermografie real gemessene Temperaturverläufe auf die Folie aufgeprägt werden. Nach Vorgabe einer Folientemperaturverteilung in der Simulation wird anschließend der Prozess der Kühlung mittels Kühlstempel simuliert. Da die Folie durch den Kontakt mit dem Stempel sowohl thermisch wie auch mechanisch beeinflusst wird, wurde ein Skript entwickelt, das die Übergabe der Temperaturprofile und der lokalen Verformung durch den Kühlstempel in die sich anschließende Umformsimulation ermöglichte (vgl. Anhang 18.1). Das Skript liest Temperatur- und Wanddickeninformationen für jeden Knotendatenpunkt der Simulation aus und stellt sie der Umformsimulation zur Verfügung. Zur Analyse des Temperaturverlaufs wird in Anlehnung an die experimentellen Messungen entlang von 27 äquidistant verteilten Punkten über den Durchmesser der Formfläche der Folie die Temperatur ausgelesen und auf 14 Messpunkte reduziert (analog zu Bild 5.2). Die Darstellung der Ergebnisse der resultierenden Wanddicken erfolgt wie bekannt.

Es ergibt sich folgender Aufbau der Simulationsroutine:

- Prozess- und Geometrieparameter der Kühlsimulation festlegen
- Kühlsimulation durchführen

- Übergabe des Temperaturprofils sowie der lokalen Wanddicken an die Umformsimulation und Umforminformationen
- Umformsimulation durchführen
- Darstellen der Wanddickenverteilung

7.1.1 Verwendete Randbedingungen

Die Folie sowie alle Werkzeugkomponenten werden entsprechend der realen Abmaße in der Simulation implementiert. Der Kühlstempel befindet sich über der erwärmten Folie und verfährt anschließend zur Kühlung auf die Folie. In der Simulation wird die Wärmeübertragung durch Wärmeleitung dargestellt. Zur Positionierung der Folie wurden die Knotenpunkte der Folie an der Position des Werkzeugrands fixiert. Dadurch wurde die Volumenkonstanz in der Simulation wie sie auch in der Realität auftritt, berücksichtigt [IS16, TB99]. Der Kühlstempel ist konzentrisch zur Kavität fixiert. Der Reibungskoeffizient des aus Aluminium bestehenden Stempels wurde zu einem Wert von 0,28 angenommen [NN12]. Der Wärmetransport zwischen Folie und Stempel wird in der Simulation durch die Funktion der Wärmeleitung „*Gap Conductance“ beschrieben [NN12]. Bei direktem Kontakt wird nach [DRA+08] zunächst ein Wärmeübertragungskoeffizient von 150 W/m²K angenommen, der ab einer Distanz des Kühlstempels zur Folie von 1 mm bis zum Folienkontakt (entspricht Abstand 0 mm) linear von 0 W/m²K auf 150 W/m²K zunimmt. Die Ermittlung von Wärmeübertragungseigenschaften ist allerdings von vielen Parametern abhängig und stellt somit eine große Herausforderung dar [BS16]. Auf die Anpassung des Wärmeübergangskoeffizienten wird später (Kapitel 7.2) genauer eingegangen. Weiterhin wurde in der Simulation die Gravitation berücksichtigt, da die Folie durch die abnehmende Materialfestigkeit bei höheren Folientemperaturen durchhängt. Durch den Durchhang ergaben sich je nach Kühlstempelgeometrie unterschiedliche Kontaktbedingungen. Der Folie wurde in Anlehnung an die praktischen Versuche eine Temperatur von 121 °C zugewiesen. Zur Absicherung wurden Versuche durchgeführt, bei denen die Folie lokal unterschiedliche Folientemperaturen aufwies, da eine ideal homogene Temperaturverteilung der die Heizstrecke verlassenden Folie in der Realität kaum zu erreichen ist. Die durch Thermografieaufnahmen ermittelten Temperaturunterschiede betragen maximal 5 °C und führten zu keinen nennenswerten Unterschieden in den Simulationsergebnissen der Ausformresultate, sodass diese Ergebnisse nicht weiter dargestellt werden. Die ermittelten Temperaturprofile sowie die lokalen Verformungen werden nach der Simulation an die Umformsimulation übergeben.

Das Werkzeug bzw. die Kavität, in die die Folie hineingeformt wurde, wurde als starre und somit fixierte Geometrie betrachtet, die lediglich als Kontaktfläche für die Folie dient. Der

zeitliche Verlauf des Druckniveaus der Formluft wurde aus [Ede15] übernommen und ist in Tabelle 7.1 dargestellt. Zum Druckaufbau wurde die Flächenlastenfunktion „*Dsload“ von Abaqus verwendet, die durch die Angabe von Druck und Zeitpaaren den Druckverlauf modelliert [NN12].

Zeit [s]	Druck [bar]
0	0
0,15	4,65
0,4	5

Tabelle 7.1: Parameter des Druckluftverlaufs in Anlehnung an [Ede15]

Weiterhin erfolgt die Umformung isotherm. Die Annahme der direkten Erstarrung der Folie bei Werkzeugkontakt wurde ebenfalls aus [Ede15, Mar18, TB99] übernommen. Dabei wird die schlagartige Verfestigung des mit dem Werkzeug in Kontakt tretenden Materials durch einen sehr hohen Reibkoeffizient zwischen den beiden Flächen modelliert. Die als konstant angenommen Stoffdaten des Stempels sowie der verwendeten PS-Folie sind in Tabelle 7.2 zusammengefasst:

	Einheit	PS-Folie	Aluminium-Stempel
Wärmekapazität	[J/kgK]	1300	920
Wärmeleitfähigkeit	[W/mK]	0,17	200
Dichte	[kg/m ³]	1050	2700

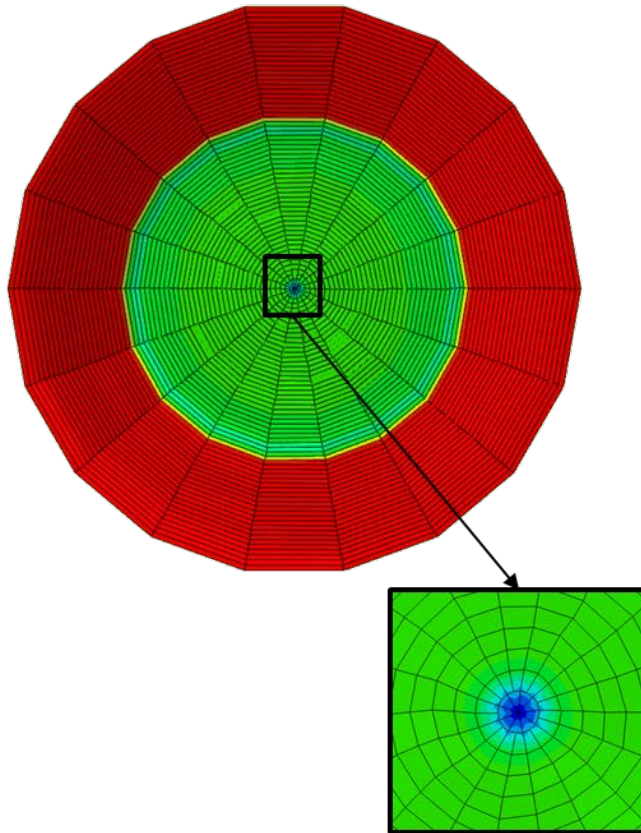
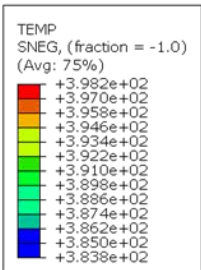
Tabelle 7.2: Stoffdaten des Kühlstempels sowie der eingesetzten PS-Folie]

Zur Simulation müssen prozessrelevante Geometrien diskretisiert werden. Die Folie, das Werkzeug und der Kühlstempel wurden unterschiedlich fein vernetzt. Die nötige Knotenzahlen der Folie wurden bei einer Sensitivitätsanalyse so weit verkleinert, bis eine Knotenzahl ermittelt wurde, bei der sich der entstehende Temperatur- und Wanddickenverläufe einer Kühlsimulation keinen weiteren Einfluss auf die Ergebnisse aufwiesen. Auf Basis der Sensitivitätsanalyse wurde eine Elementgröße von 0,25 mm festgelegt, die zu hinreichend genauen Ergebnissen bei akzeptabler Rechenzeit führte. Lediglich das Netz in der Mitte der Folie musste modifiziert werden, da dort eine Singularität auftrat, die zu physikalisch nicht sinnvollen Ergebnissen führte. Durch eine nicht mehr rotationssymmetrische Neuvernetzung der Folienmitte konnte dieses Problem behoben werden. Beide Vernetzungen sind in Bild 7.1 dargestellt. In Bild 7.2 ist die exemplarisch die Kühlsimulation vor dem Eintritt des Stempelkontakts mit der Folie (links) sowie die Umformung der Folie (rechts) dargestellt.

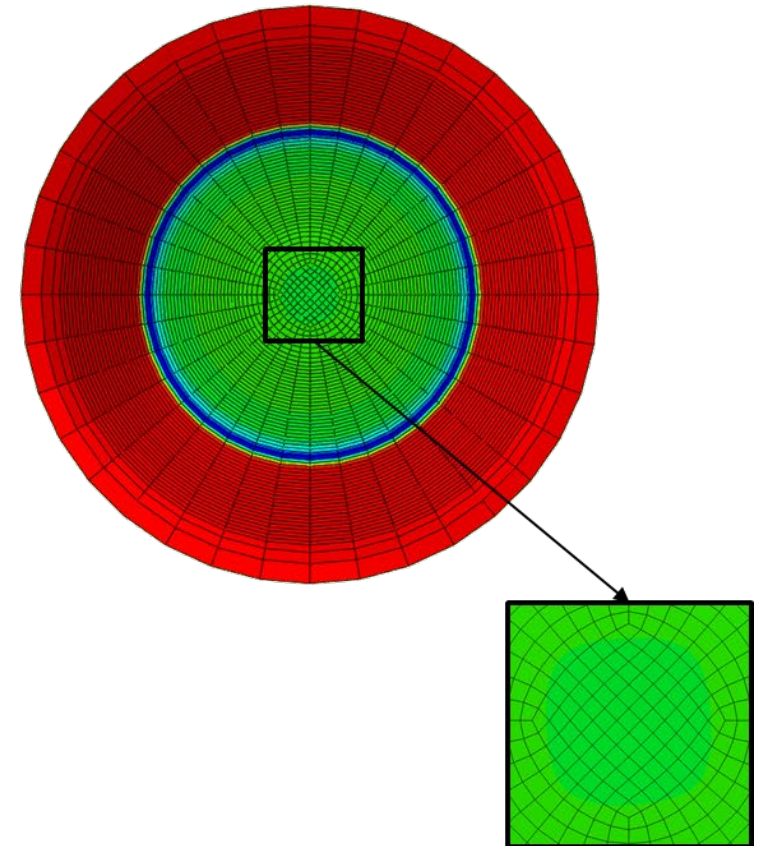
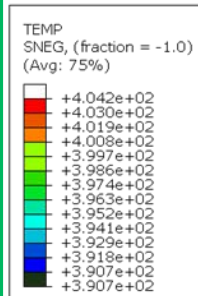
Kühlstempel und Becherkavität sowie der Folie wurden in Abhängigkeit des Einsatzzwecks unterschiedlichen Elementtypen von Abaqus zugewiesen. Die Folie wurde in der Kühl- und Umformsimulation durch Schalenelemente des Typs S4RT und S4R modelliert. Diese werden für Geometrien verwendet, bei denen eine Raumrichtung vernachlässigt werden kann [NN12].

Angepasste Vernetzung der Folie zur Vermeidung einer Singularität

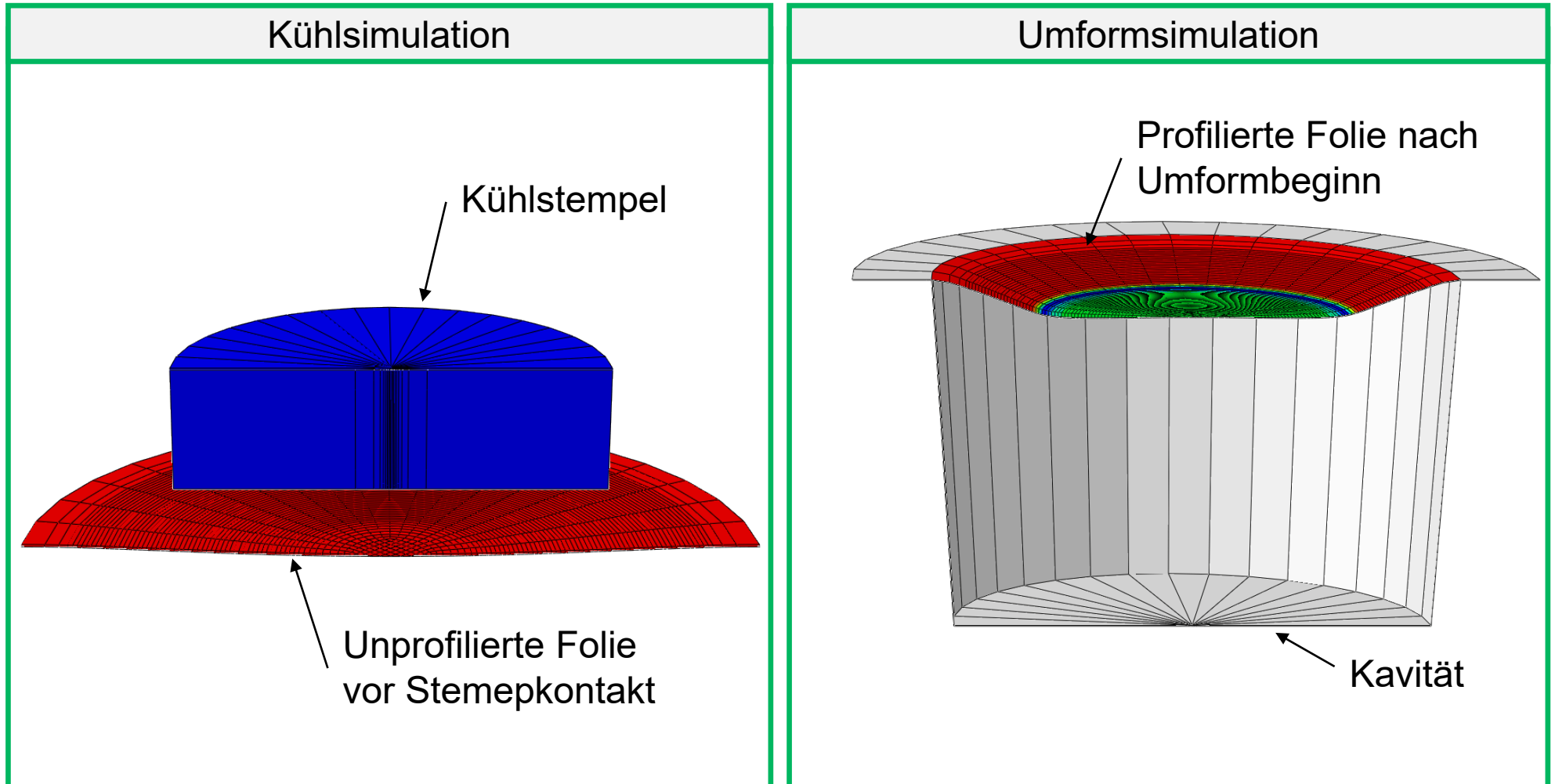
Ursprüngliche Vernetzung



Angepasste Vernetzung



Darstellung der Kühlsimulation sowie der anschließenden Umformung der Folie in der Kavität



Für die Umformung und die Werkzeugelemente werden die Elementtypen R3D4 verwendet. Es handelt sich um Rigid 3D Elemente, die ebenfalls durch 4 Nodes beschrieben werden. Sie werden typischerweise als Kontaktoberflächen verwendet. Wärmeaustauschprozesse werden bei diesem Elementtypen nicht berechnet. Der Stempel, der lediglich in der kombinierten Wärmeübertragungs- und Umformsimulation eingesetzt wurde, wurde mit „C3D6T“ Elementen modelliert. Dabei handelt es sich um 3D-Elemente einer Wärmeübertragungs- und Umformsimulation, die durch 6 Nodes gebildet werden [NN12].

7.1.2 Materialcharakterisierung und Materialmodell zur Beschreibung der Dehnviskosität

Zur Durchführung der Simulationen sind Materialdaten sowie mathematische Modelle zur Beschreibung des Materialverhaltens notwendig. Zur Ermittlung des Materialverhaltens der Kunststoffe bei äquibiaxialer Dehnung wurden die verwendeten Materialien mittels des Reckrahmens Queen's Biaxial Stretcher der Queen's University Belfast, Belfast, Irland, bei verschiedenen Materialtemperaturen sowie Verstreckgeschwindigkeiten charakterisiert. Die so ermittelten Spannungen in Abhängigkeit des Verstreckgrads werden in Spannungs-Dehnungs-Diagrammen dargestellt. Das Materialverhalten muss anschließend mathematisch beschrieben werden. In Anlehnung an vorangegangene Arbeiten von [Ede15, Leo11] wird das hyperelastische Materialmodell nach Yeoh verwendet. Für weiterführende Informationen sei auf den Anhang 18.2 verwiesen.

7.2 Anpassung des Wärmeübergangskoeffizienten

Bei der Simulation der Temperaturprofile konnte festgestellt werden, dass die resultierenden Temperaturprofile der Simulation auf der Folie von denen in Experimenten gemessenen Profilen abwichen. Der aus der Literatur entnommene Wärmeübergangskoeffizient von $150 \text{ W/m}^2\text{K}$ und einer linear von 0 mm auf 1 mm zunehmenden Einflussdistanz der Wärmeübertragung aus der Folie in den Stempel führte somit nicht zu hinreichend genauen Ergebnissen. Die resultierenden Temperaturen der gekühlten Ringbereiche der Folie waren gegenüber den gemessenen Folientemperaturen der gekühlten Ringbereiche zu hoch, sodass der Wärmeübergangskoeffizient erhöht werden musste. Die Anpassung des Wärmeübergangskoeffizienten erfolgte mittels eines Reverse-Engineering-Ansatzes. Bei der Anpassung wurden sowohl die Einflussdistanz wie auch der Wärmeübergangskoeffizient angepasst, bis die simulierten Temperaturverläufe den Verläufen aus der Realität mit guter Näherung entsprachen. Die Wahl des Wärmeübergangskoeffizienten beeinflusste somit die Werte der Temperaturminima in der Folienmitte bzw. im direkten Kontaktbereich zwischen Folie und Stempel. Ebenfalls wurden die Temperaturgradienten zwischen

Temperaturminimum und Folienmitte beeinflusst. Es zeigte sich, dass eine lineare Funktion mit lediglich zwei Wertepaaren von Abstand und Wärmeübergangskoeffizient nur den Wert des Temperaturminimums sowie den inneren Folienbereich korrekt darstellen. Um jedoch auch den Temperaturgradienten von der Folienmitte bis zum Temperaturminimum im Kontaktbereich hinreichend genau nachzustellen, wurden weitere Wertepaare zur Definition der Wärmeübertragungsfunktion benötigt.

Eine gute Näherung des Temperaturverlaufs wurde mit der folgenden Wertepaaren ermittelt, die in Tabelle 7.2 dargestellt sind. Es kann festgehalten werden, dass die Anpassung des Wärmeübergangskoeffizienten nicht trivial ist. Durch einen Reverse-Engineering-Ansatz ist die Anpassung des Wärmeübergangskoeffizienten jedoch möglich.

Kontaktdistanz [mm]	Wärmeübertragungsfaktor [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]
0	225
0,2	140
0,5	85
1,2	0

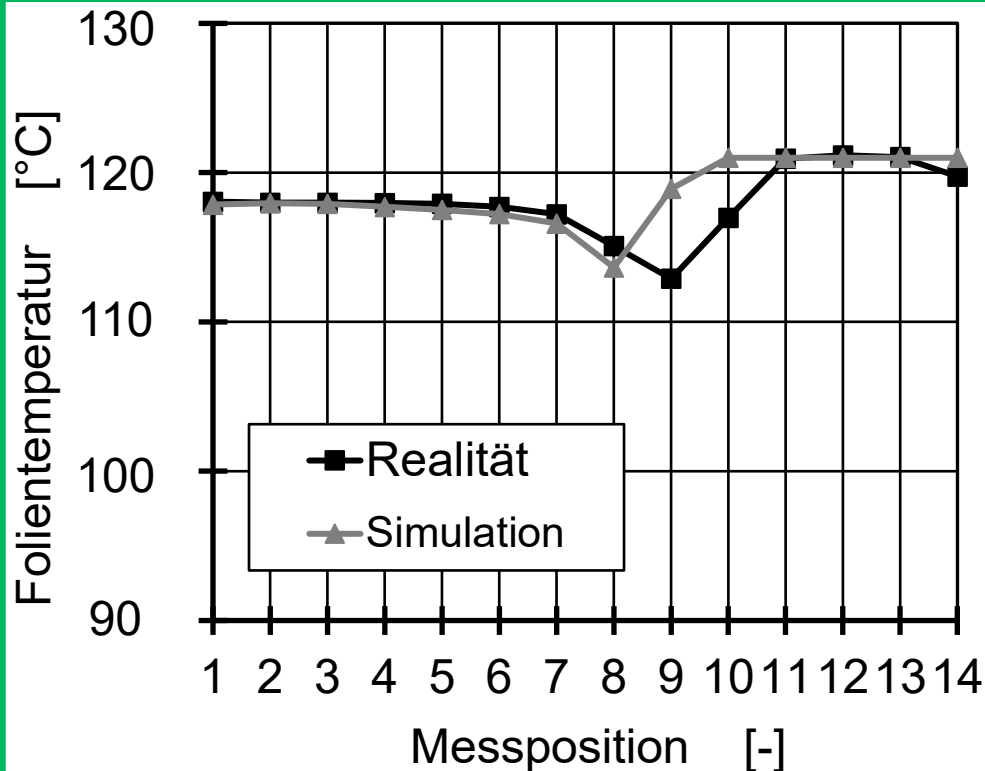
Tabelle 7.2: Wertepaare der angepassten Wärmeübertragungsfunktion zwischen Kühlstempel und Folie

Die gewählte Wärmeübertragungsfunktion führte zu den Temperaturverläufen, die in Bild 7.3 bei verschiedenen Prozessparametereinstellungen sowie einem Stempeldurchmesser von 35 mm exemplarisch dargestellt sind. Die Temperatur des Folienzentrums, des Temperaturminimums und des Temperaturverlaufs zwischen Zentrum und Minimum wurden qualitativ richtig abgebildet. Es ist ebenfalls zu erkennen, dass auch die Temperatur des Bereichs innerhalb des stärker gekühlten Kreisrings gekühlt wird, was in den IR-Bildern aufgrund der systemischen Ungenauigkeit nicht direkt zu erkennen ist. Auffällig ist jedoch der räumliche Versatz der Temperaturen im Kontaktbereich zwischen Folie und Stempel. Der räumliche Versatz des Temperaturtiefpunkts von ca. 2 mm (entspricht bei der Temperaturprofilierung auf der Folie einer Messposition) konnte bei den untersuchten Parametern nicht beeinflusst werden. Ein in der Realität unterschiedlich ausfallender Foliendurchhang oder nicht betrachtete Wärmestrahlungsphänomene sind mögliche Ursachen, sodass zur genaueren Berechnung weiterführende Untersuchungen notwendig sind.

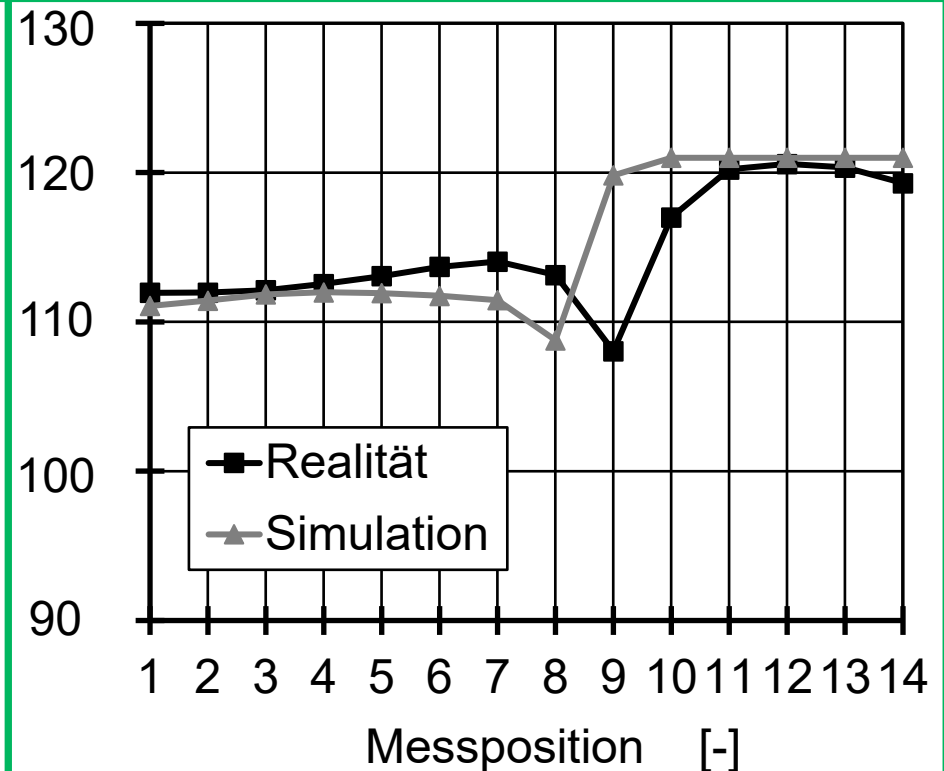
Resultierende Temperaturprofile nach Anpassung des Wärmeübergangskoeffizienten und der Einflussdistanz

Stempeldurchmesser: 35 mm; Stempeltemperatur: 20 °C; Kontaktzeit: 0,2 s
Material: Polystyrol

Stempelüberstand: 0 mm



Stempelüberstand: 4 mm



7.3 Simulation der Einflüsse der Kühlstempelgeometrien sowie Prozessparameter auf die resultierenden Temperaturprofile

Mit der aufgebauten Simulation wurden anschließend die Einflüsse von verschiedenen Kühlstempelgeometrien sowie Prozessparametereinstellungen analysiert. Aufgrund des sich niederschlagenden Wassers am Kühlstempel bei den gewählten Kühlstempeltemperaturen von 0 °C sowie 10 °C wurde die Kühlstempeltemperatur für weitere Versuche bzw. die Simulationen auf konstante 20 °C gesetzt. Da sich bei der Durchführung der experimentellen Versuche zur Erprobung der aktiven Kühlung zeigte, dass ein Stempeldurchmesser von 40 mm zu einer Dickstelle im Bereich der MP 10 in der Becherseitenwand führt, wurden kleinere Stempel ausgewählt, um das Ausdünnen der Folie im Bereich der Dünnstelle zwischen Messposition 6 und 7 zu vermeiden. Dabei wurden die Kühlstempeldurchmesser von 25 mm, 30 mm, 35 mm und 40 mm ausgewählt. Der Stempelüberstand wird zwischen 0 mm und 4 mm variiert. Weiterhin wurde eine Variation der Kontaktzeit (0,05 s, 0,1 s, 0,2 s) vorgenommen, sodass die Temperaturprofile auch durch verschiedenen Kontaktzeiten zwischen der Folie und dem Kühlstempel beeinflusst wurden. Ausgewählte Ergebnisse werden im Folgenden vorgestellt. Anschließend erfolgt die Darstellung der resultierenden Wanddickenverteilungen und der Vergleich mit den experimentell ermittelten Temperaturprofilen und Wanddickenverteilungen.

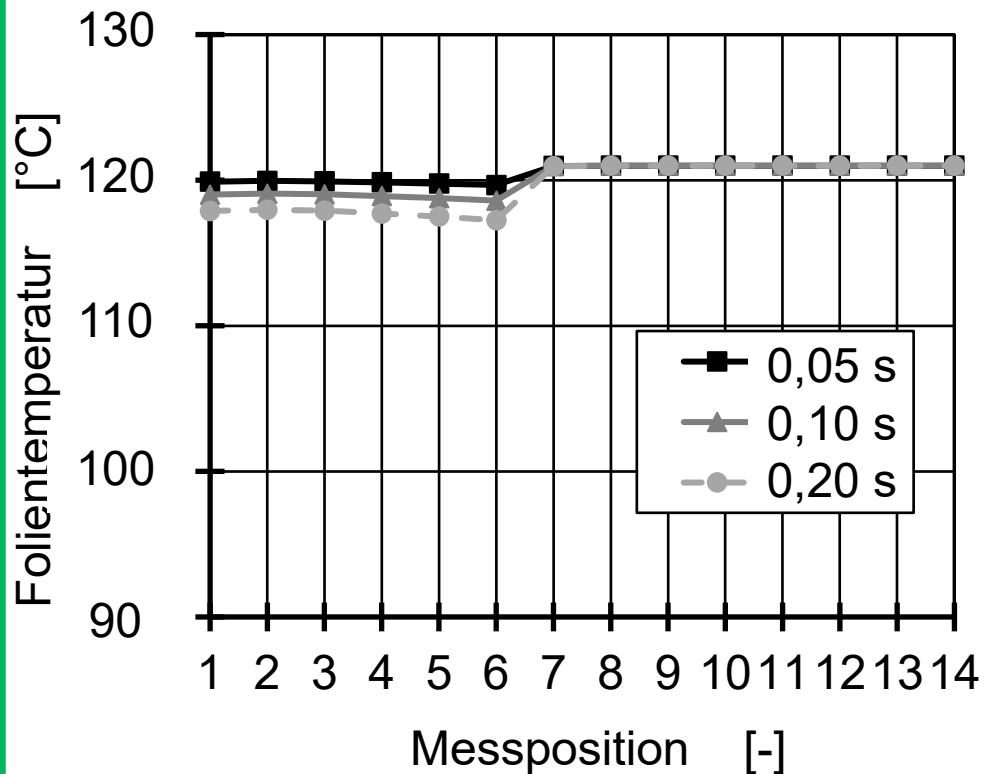
In Bild 7.4 sind die Temperaturverläufe dargestellt, die sich aus den Simulationen mit einer Kühlstempeltemperatur von 20 °C sowie verschiedenen Stempeldurchmessern und Stempelüberständen ergeben. Deutlich zu erkennen ist zum einen der Einflussbereich des Kühlstempels, in dem die Temperaturen der Folie herabgesetzt werden und zum anderen die Temperaturunterschiede, die sich aufgrund der längeren Kontaktzeit sowie dem Stempelüberstand ergeben.

Bei einem Stempeldurchmesser von 25 mm und einem Stempelüberstand von 0 mm ergeben sich die maximalen Temperaturunterschiede lediglich zu ca. 2,1 °C an MP 1 bei Kontaktzeiten der Formluft von 0,05 s bzw. 0,2 s. An MP 6 beträgt der Temperaturunterschied 2,4 °C und ist somit nur geringfügig größer. Von MP 6 auf MP 7 steigt die Temperatur auf konstante 121 °C an, was der Ausgangsfolientemperatur entspricht. Der Kühlstempel weist in diesem Bereich keinen Einfluss auf die Folie auf. Bei der Änderung des Stempelüberstands von 0 mm auf 4 mm sowie einem Stempeldurchmesser von 35 mm werden die Temperaturunterschiede im Wirksamkeitsbereich des Kühlstempels erhöht sowie größere Temperaturgradienten zwischen beeinflussten und unbeeinflussten Folienbereich erzeugt. Der Temperaturunterschied an MP 1 bei einer Kontaktzeit von 0,05 s und 0,2 s beträgt ca. 5,1 °C und ist damit in etwa doppelt so groß wie bei einem Stempelüberstand von 0 mm. Der maximale Temperaturunterschied an MP 8 in Bezug auf die

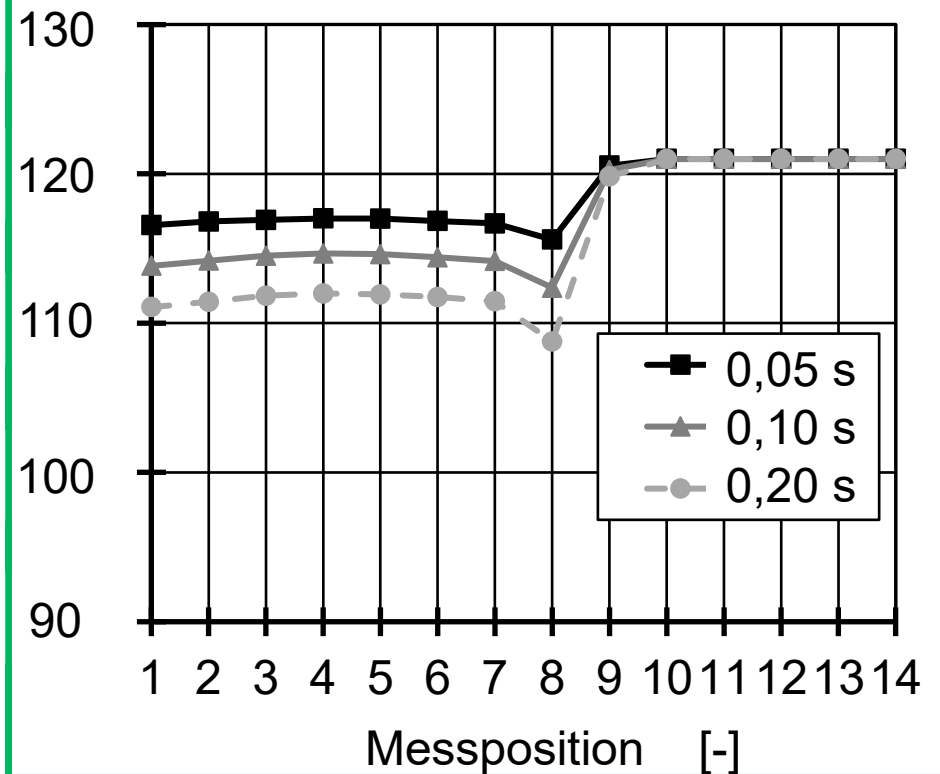
Temperaturprofile bei Variation des Stempeldurchmesser, des Stempelüberstands sowie der Kontaktzeit

Stempeltemperatur: 20 °C; Material: Polystyrol

Stempeldurchmesser: 25 mm
Stempelüberstand: 0 mm



Stempeldurchmesser: 35 mm
Stempelüberstand: 4 mm



Folienausgangstemperatur beträgt ca. 12 °C und ist liegt somit im Bereich der bei *Martens* benötigten Temperaturabsenkung [Mar18]. Diese Erhöhung der Temperaturdifferenzen ist darauf zurückzuführen, dass durch den Kontakt des Stempels mit der Folie die Wärmeübertragung besonders hoch ist, während sie sich aufgrund des Foliendurchhangs im Bereich von MP 1 bis MP 7 leicht verringert, weil kein vollständiger Kontakt zwischen Folie und Kühlstempel besteht. In Bild 7.5 sind exemplarisch zwei Temperaturprofile dargestellt, die sich bei einer Kontaktzeit von 0,05 s und 0,2 s sowie einem Stempeldurchmesser von 35 mm bei sonst konstanten Prozesseinstellungen ergeben. Auch im Falschfarbenplot sind die Temperaturunterschiede bei verschiedenen Kontaktzeiten deutlich zu erkennen.

Bei der Variation weiterer Stempelüberstände bzw. Stempeldurchmesser ergeben sich die gleichen Phänomene, weshalb diese nicht erneut dargestellt werden. Eine Änderung des Stempeldurchmessers erzeugt unterschiedlich große Einflussbereiche, während die Änderung der Kontaktzeit zu unterschiedlichen Absenkungen der Temperatur in den gekühlten Ringbereichen führt.

7.4 Simulation der Einflüsse der Kühlstempelgeometrien sowie Prozessparameter auf die resultierenden Wanddickenverteilung der Formteile

Die simulierten Temperaturprofile wurden der Umformsimulation übergeben, bei der die temperaturprofilierter Folie mit Formluft umgeformt wird. Die zugehörigen Wanddickenverteilungen zu den dargestellten Temperaturprofilen aus Bild 7.3 mit den entsprechenden Prozesseinstellungen sind in Bild 7.6 dargestellt. Bei einem Durchmesser des Kühlstempels von 25 mm (Bild 7.6, links) ergibt sich ein vergleichsweise dicker Bodenbereich von bis zu 0,44 mm an MP 1, wenn eine Kontaktzeit von 0,2 s eingesetzt wird. Die Wanddicke ist bei dieser Kontaktzeit um ca. 0,15 mm dicker als bei einer Kontaktzeit von 0,05 s. Von MP 1 bis MP 7 fällt die Wanddickenverteilung auf bis zu 0,16 mm ab, wobei die dünnste Wanddicke an MP 7 lokalisiert ist. Von der Dünnstelle bis zur Öffnung des Formteils steigt die Wanddickenverteilung kontinuierlich bis auf ca. 0,6 mm an und unterscheidet sich zwischen den verschiedenen Kontaktzeiten nur geringfügig. Beim Formteil, bei dem der Bodenbereich dicker ausgeführt ist, wird der Wandbereich aufgrund der geltenden Volumenkonstanz leicht dünner ausgeführt und umgekehrt.

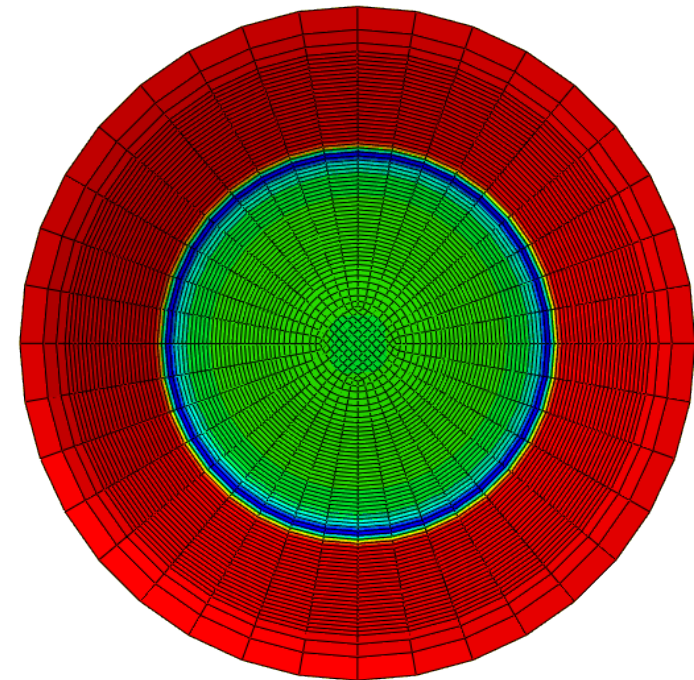
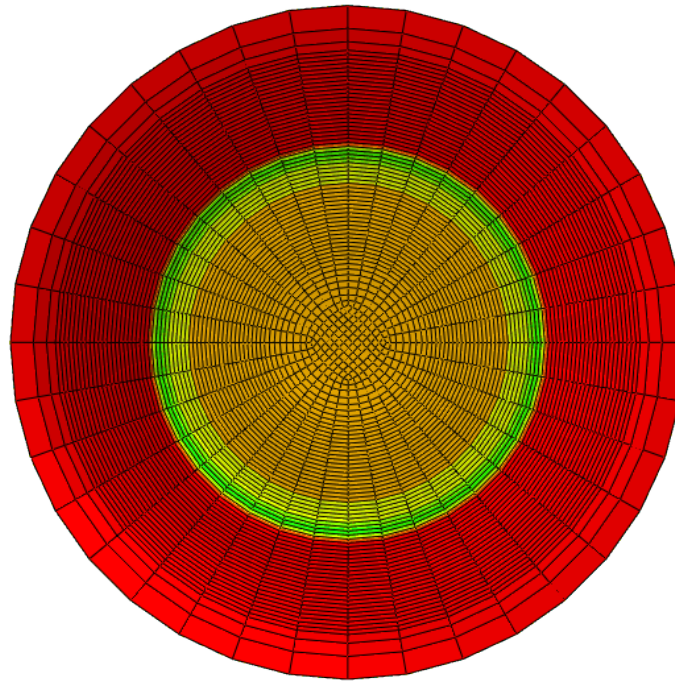
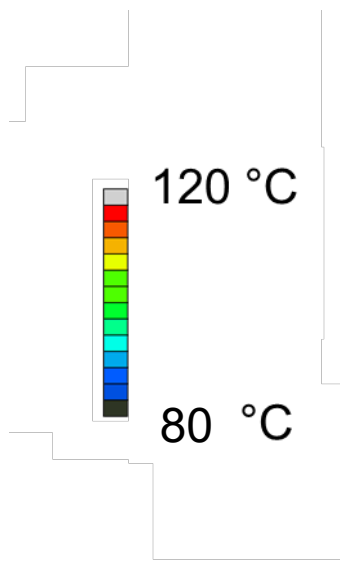
Bei der Wahl eines beispielsweise größeren Kühlstempels mit einem Durchmesser von 35 mm sowie einem verstärkten Kontakt zwischen Folie und Stempel aufgrund des Stempelüberstands von 4 mm, wurden die Wanddickenverläufe stärker beeinflusst (Bild 7.6, rechts). Zum einen ist der Einflussbereich des Kühlstempels größer und zum anderen werden die lokalen Verstreckwiderstände stärker beeinflusst, weil die Temperaturunterschiede größer ausfallen. An MP 1 beträgt die dickste Wanddicke bei einer Kontaktzeit von 0,2 s ca. 0,38 mm und ist leicht dünner ausgeprägt als bei 0,2 s Kontaktzeit, einem

Simulierte Temperaturprofile bei verschiedenen Kontaktzeiten des Kühlstempels mit der Folie ($WÜK \alpha = 330 \text{ W/m}^2\text{K}$)

Kontaktzeit:

0,05 s

0,2 s



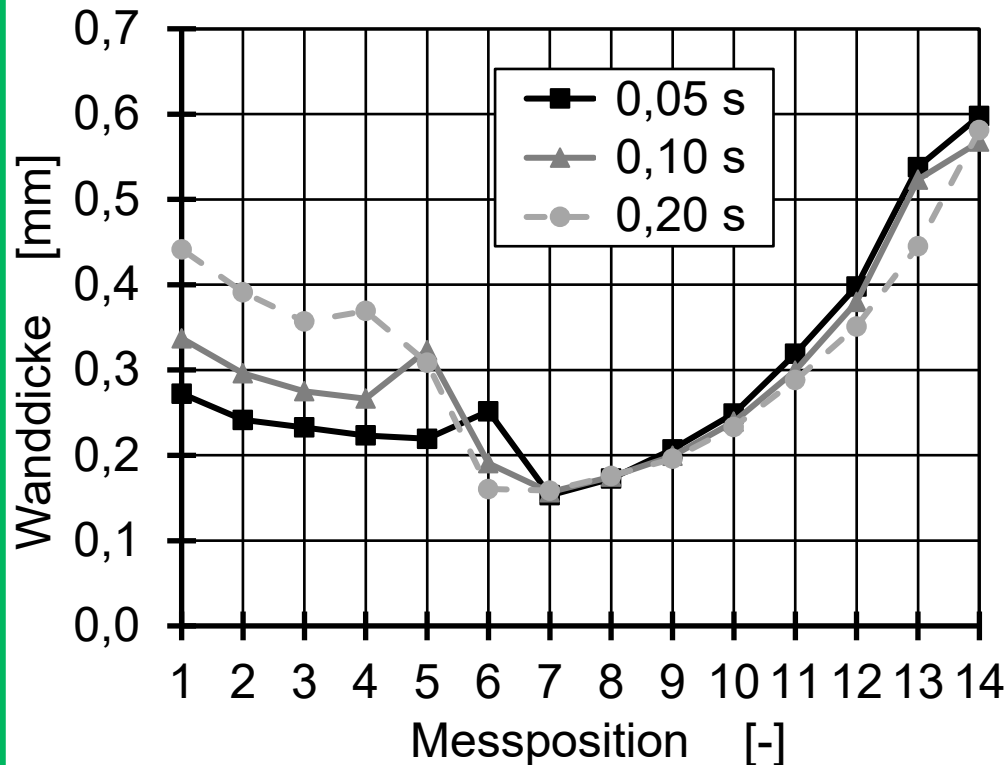
Folientemperatur: 125 °C
Stempeldurchmesser: 35 mm, Vollmaterial
Stempeltemperatur: 20 °C
Material: Polystyrol



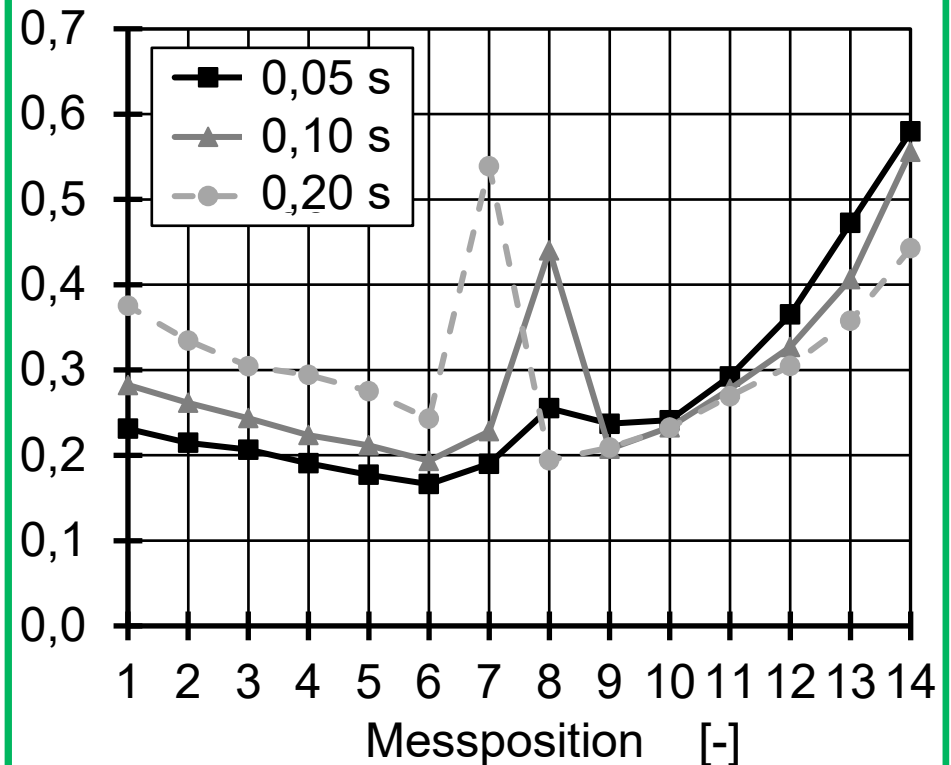
Simulierte Wanddickenverteilungen bei verschiedenen Stempelgeometrien, Stempelüberständen sowie Kontaktzeiten

Stempeltemperatur: 20 °C; Material: Polystyrol

Stempeldurchmesser: 25 mm
Stempelüberstand: 0 mm



Stempeldurchmesser: 35 mm
Stempelüberstand: 4 mm



Stempeldurchmesser von 25 mm sowie einem Überstand von 0 mm. Die reduzierte Wanddicke in diesen Bereichen gegenüber den Wanddickenverteilungen der ebenso dargestellten Prozesseinstellungen ist durch die stark ausgeprägten Schreckmarken im Bereich der MP 6 und MP 7 erklären. Die Schreckmarken sind lokale Materialanhäufungen und entstehen durch die starke Kühlung der Folie durch einen Kontaktpartner, in diesem Fall der Kühlstempel. Die Bildung der Schreckmarken ist aus der Formung mittels Vorstreckstempel ebenfalls bekannt [IS16]. Im Bereich des direkten Stempelkontakts ist die Ausprägung besonders groß. Aufgrund der starken Kühlung sinkt die Folientemperatur in diesem Bereich besonders stark, wodurch das Material schwerer verstreckbar ist. Durch den erhöhten Verstreckwiderstand der Folie in diesem Bereich wird die Verstreckung in die Folienbereiche verlagert, die einfacher verstreckbar, da sie eine höhere Folientemperatur aufweisen. Durch die Materialanhäufung im Schreckmarkenbereich sowie der erschwerten Verstreckung werden die anderen Formteilbereiche stärker verstreckt, sodass selbst bei längeren Kontaktzeiten die Formteilmöden stärker verstreckt werden können. An diesem Beispiel kann das stark temperaturabhängige nichtlineare Dehnviskosität von Kunststoffen verdeutlicht werden (vgl. Bild 3.1). Die Ausprägung der Schreckmarke mit einer Dicke von über 0,5 mm ist bei einer langen Kontaktzeit besonders stark ausgeprägt, während bei einer kurzen Kontaktzeit durch die geringere eingebrachte Temperaturdifferenz der Einfluss eher gering ausfällt. Die Wanddicke des Schreckmarkenbereichs an MP 8 beträgt lediglich 0,26 mm. Generell ist es das Ziel, Schreckmarken zu vermeiden, da diese optische Fehlstellen darstellen sowie zu mechanischen Fehlstellen aufgrund einer ungleichmäßigen Wanddickenverteilung führen können [IS16, TB99].

Wie zuvor beschrieben führen dickere Bodenbereiche der Formteile zu dünneren Wandbereich aufgrund der Volumenkonstanz der Formteile. Liegen die Wanddicken im Bereich von MP 1 bis MP 8 höher als eine Vergleichswanddicke, so liegen sie im Bereich von MP 9 bis MP 14 darunter. Anzumerken ist, dass es sich im Bereich von MP 1 bis MP 7 um eine Kreisfläche (Becherboden) handelt, während die Darstellung von MP 8 bis MP 14 die Wand des Formteils darstellt (Mantelfläche eines Kegelstumpfs). Da die Fläche des Wandbereichs größer ist als die des Formteilmödens, stellen bereits geringe Wanddickendifferenzen im Wandbereich des Formteils größere lokale Massenunterschiede dar.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die durchgeführten Simulationen zu physikalisch sinnvollen Ergebnissen führen. Um die Simulationsgüte weiter zu beurteilen, wurden Formteile bei verschiedenen Prozesseinstellungen geformt, die Wanddickenverteilung analysiert und mit den simulierten Ergebnissen verglichen. Weiterhin war es Ziel, die Schreckmarkenbildung möglichst zu reduzieren.

7.5 Vergleich der simulierten sowie realen Wanddickenverteilungen

In Bild 7.7 ist der Vergleich der simulierten mit den realen Wanddickenverteilungen exemplarisch für zwei verschiedene Stempeldurchmesser dargestellt. Ebenso wurde der Stempelüberstand variiert. Die Kontaktzeiten betragen jeweils 0,2 s. Dargestellt werden die Wanddickenverteilungen des Becherformteils mit einem Durchmesser von 60 mm sowie einer Tiefe von 40 mm.

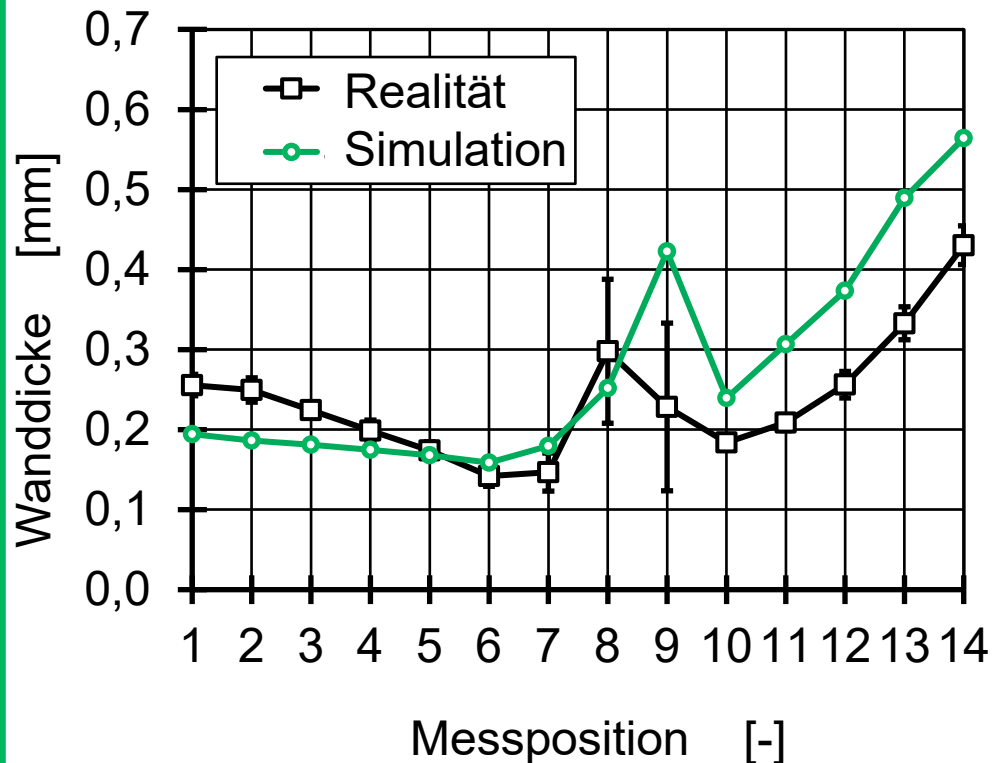
Bei beiden Stempeldurchmessern sowie Stempelüberständen wird der Verlauf der Wanddicke der Formteile auch in der Simulation qualitativ richtig abgebildet. Allerdings werden manche Formteilmereiche bezüglich ihrer Dicke unter- bzw. überschätzt. Insbesondere am Beispiel des Bodenbereichs des Formteils, das mit einem Stempeldurchmesser von 35 mm, einem Stempelüberstand von 4 mm sowie einer Kontaktzeit von 0,2 s hergestellt wurde, zeigte sich, dass die Simulationen die Dicke des Bodenbereichs stark unterschätzt. Aufgrund der Volumenkonstanz führt dies dazu, dass andere Formteilmereiche in der Wanddicke steigen müssen. Die Abweichungen an MP 1 werden besonders groß, wenn eine erhöhte Kontaktzeit und somit ein starker Temperaturunterschied auf der Folie erzeugt werden. Da die Abweichungen der globalen Verläufe zwischen den realen und simulierten Temperaturprofilen vor der Umformung vergleichsweise gering sind, ist eine mögliche Erklärung für die Abweichungen der Wanddickenverteilungen, dass die Genauigkeit des in der Simulation verwendeten Materialmodells zur Beschreibung der Dehnviskosität nicht ausreichend hoch war. Es wurden drei verschiedene Folientemperaturen bei jeweils drei verschiedenen Verstreckgeschwindigkeiten getestet und das Yeoh-Modell an diese Daten gefittet. Aufgrund des stark temperaturabhängigen sowie nichtlinearen Materialverhaltens scheint der Versuchsraum zwar ausreichend weit aufgespannt zu sein, weil die Verläufe qualitativ sinnvoll abgebildet werden. Allerdings muss die Anzahl der Stützstellen innerhalb der gewählten Bereiche der Dehnraten sowie den gewählten Temperaturen erhöht werden, um die Berechnungsgenauigkeit zu verbessern. Durch das Erhöhen der Stützstellenanzahl wird der berechnete Fehler kleiner, der bei der Interpolation zwischen den verschiedenen Verstreckwiderständen bzw. Dehnraten bei unterschiedlicher Verstreckung entsteht. In weiteren Forschungsarbeiten muss daher genauer untersucht werden, welche Anzahl an Reckrahmenversuchen durchgeführt werden muss, um ein höhere Simulationsgüte zu erreichen. Dabei steht der Erhöhung der Genauigkeit der einhergehende Aufwand entgegen, sodass abgewägt werden muss, wie genau die Wanddickenverteilungen vorhergesagt werden sollen.

Zusammenfassend konnte gezeigt werden, dass die Simulation des Thermoformprozesses mit aktiver Kühlung möglich ist. Insbesondere die Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten stellt eine große Herausforderung dar, weil dieser von vielen

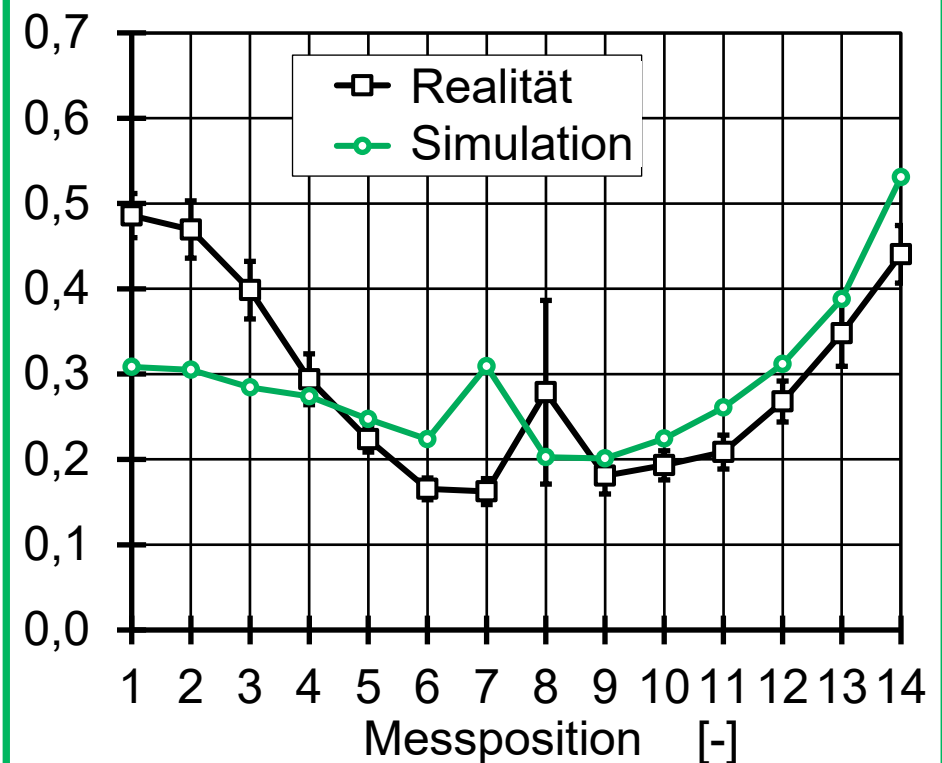
Vergleich der realen und simulierten Wanddickenverteilungen

Stempeltemperatur: 20 °C; Kontaktzeit: 0,2 s; Material: Polystyrol

Stempeldurchmesser: 25 mm
Stempelüberstand: 0 mm



Stempeldurchmesser: 35 mm
Stempelüberstand: 4 mm



Faktoren wie beispielsweise der Temperaturdifferenz, der Flächenpressung sowie der Oberflächenrauigkeit der Kontaktpartner abhängt. Strahlungs- sowie Konvektionsphänomene können in der Simulation im Ansatz durch eine Anpassung des Wärmeinflussbereichs des Wärmeübergangskoeffizienten direkt unter dem Kühlstempel berücksichtigt werden. Für eine genaue Berechnung der Temperaturprofile muss jedoch bei der Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten auf einen Reverse-Engineering-Ansatz zurückgegriffen werden, da in der Literatur keine ausreichenden Daten zur Verfügung stehen, die eine direkte Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten ermöglichen.

Bei den durchgeführten Simulationen ergab sich die homogensten Wanddickenverteilungen der Formteile bei Verwendung eines Stempeldurchmessers von 35 mm. Auf Basis der Simulationen werden weitere verfahrenstechnische Untersuchungen mit einem Stempeldurchmesser von 35 mm bei verschiedenen Prozesseinstellungen sowie weiteren geometrischen Stempelanpassungen wie beispielsweise Verrundungsradien durchgeführt.

8 VERFAHRENSTECHNISCHE UNTERSUCHUNGEN DES EINFLUSSES DER LOKALEN KÜHLUNG AUF DIE RESULTIERENDEN TEMPERATURPROFILE SOWIE WANDDICKENVERTEILUNGEN

In diesem Kapitel werden die resultierenden Temperaturprofile sowie Wanddickenverteilungen der Formteile bei verschiedenen Prozesseinstellungen auf Basis der Simulationen von Kapitel 7 analysiert und erläutert. Nach der Darstellung der Temperaturprofile der Folie sowie der daraus resultierenden Wanddickenverteilungen werden weitere Untersuchungen durchgeführt, die den Einfluss von Verrundungsradien oder bspw. weiterer Stempelmaterialien sowie Stempelbeschichtungen verdeutlichen. Teile dieses Kapitels sind bereits in [HBF20] und [HBF21] veröffentlicht worden.

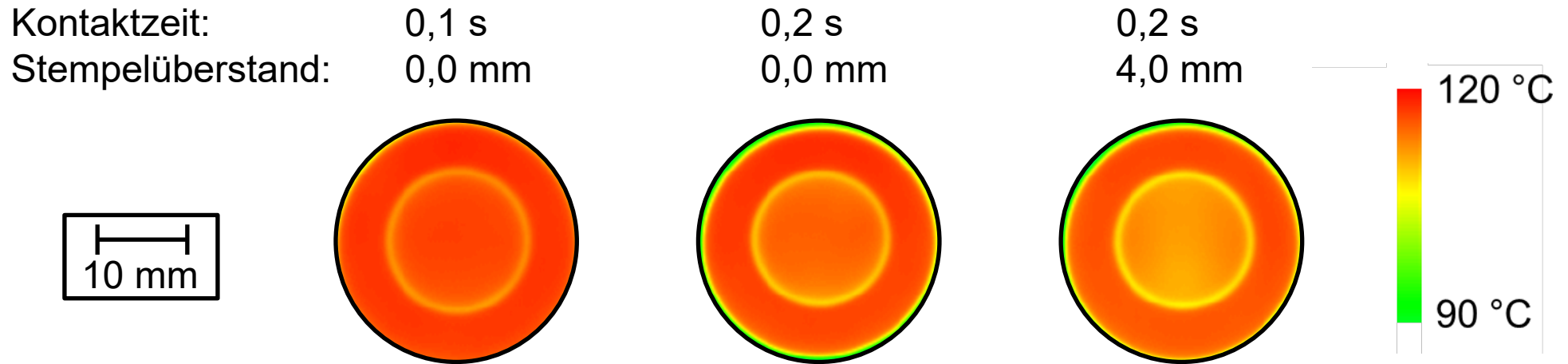
8.1 Einfluss der Kontaktzeit sowie des Stempelüberstands auf die resultierenden Temperaturprofile

In Bild 8.1 werden ausgewählte Ergebnisse dargestellt, um den Einfluss des Kühlstempels bei verschiedenen Kontaktzeiten sowie Stempelüberständen darzustellen. Die dazugehörigen Temperaturprofile sind Bild 8.2 dargestellt. Eine verlängerte Kontaktzeit führte wie auch in der Simulation erwartungsgemäß zu lokal niedrigeren Folientemperaturen aufgrund der verlängerten Wärmeabfuhr. Die Kontaktzeit wird zusätzlich durch einen möglichen Stempelüberstand erhöht, da in diesem Fall beim Zufahren des Werkzeugs der Kühlstempel mit der Folie früher in Kontakt tritt. Im Bereich der Messposition 9 zeigt die deutliche Temperaturabnahme den Bereich der Folie, der mit dem Stempel in Kontakt tritt. Im Kontaktbereich wird in Abhängigkeit der Kontaktzeit bzw. des Stempelüberstand die Folie besonders stark gekühlt. Ausgehend von der Folientemperatur von 120 °C nach der Erwärmung beträgt die Temperaturabnahme bis zu 15 °C und liegt damit leicht über der Temperatur von ca. 12 °C bei *Martens* [Mar18]. Der leichte Durchhang der Folie von ca. 2 mm nach der Halbzeugerwärmung führt beim Einsatz eines vollflächigen Kühlstempels dennoch zu einer ringförmigen Haupteinflusszone. Aufgrund von Wärmestrahlung und Konvektionseffekten wird der innere Bereich der Folie direkt unter dem Stempel (MP 1) jedoch ebenfalls leicht gekühlt, sodass die dortige lokale Temperatur je nach Prozesseinstellung von 120 °C auf bis zu 109 °C abfällt [HBF21].

8.2 Einfluss der Kontaktzeit sowie des Stempelüberstands auf die resultierenden Wanddickenverteilungen

Die Wanddickenverteilungen der Becherformteile, die bei der Formung mit einem konstanten Stempeldurchmesser von 35 mm resultierten, sind in Bild 8.3, links, dargestellt. Bei der

Darstellung der resultierenden Temperaturprofile beim Verwendung verschiedener Kühlzeiten und Stempelüberstände

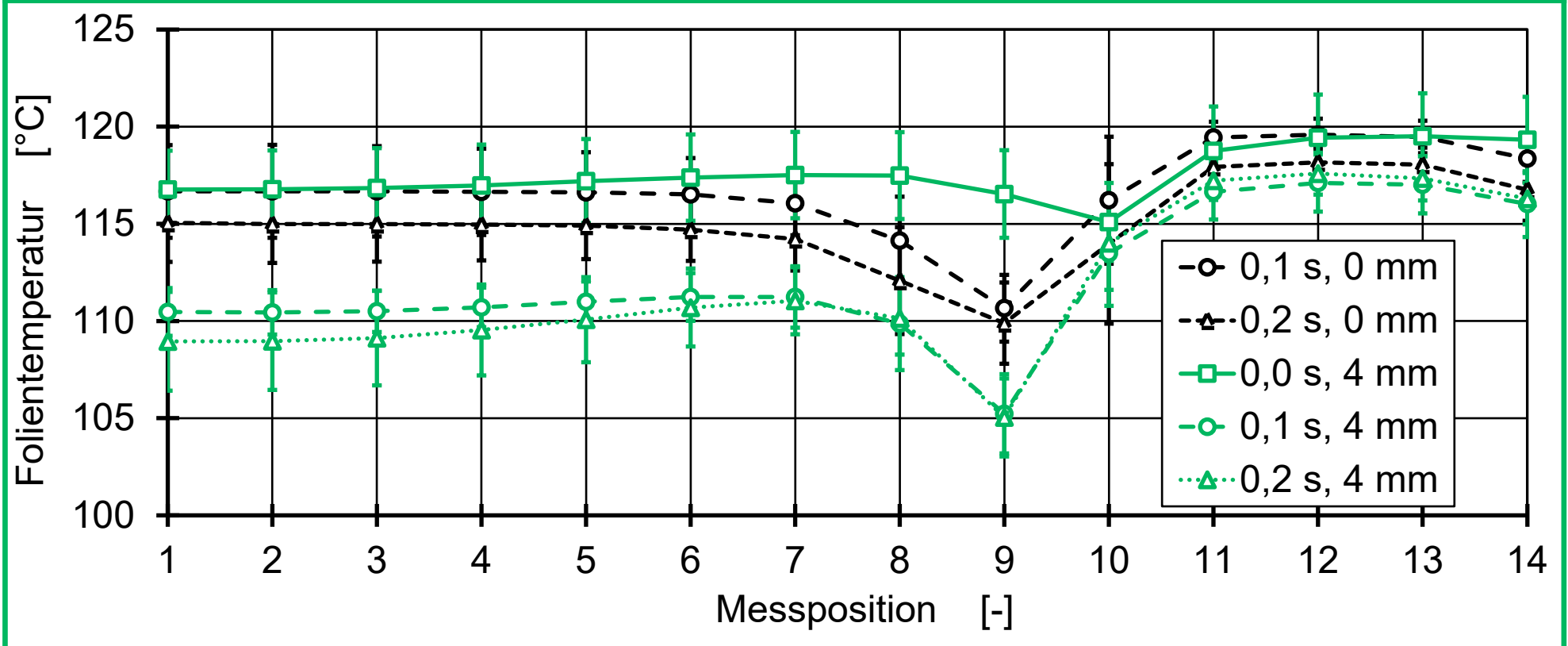


Folienmaterial: Polystyrol
Stempeldurchmesser: 35 mm, Vollzylinder
Folientemperatur: 120 °C
Stempeltemperatur: 20 °C
Messmethode: Infrarotkamera

[HBF21]

Resultierende Temperaturverläufe auf der Folie bei Variation der Kontaktzeit sowie des Stempelüberstands

Stempeldurchmesser: 35 mm, Folientemperatur: 120 °C, Material: Polystyrol

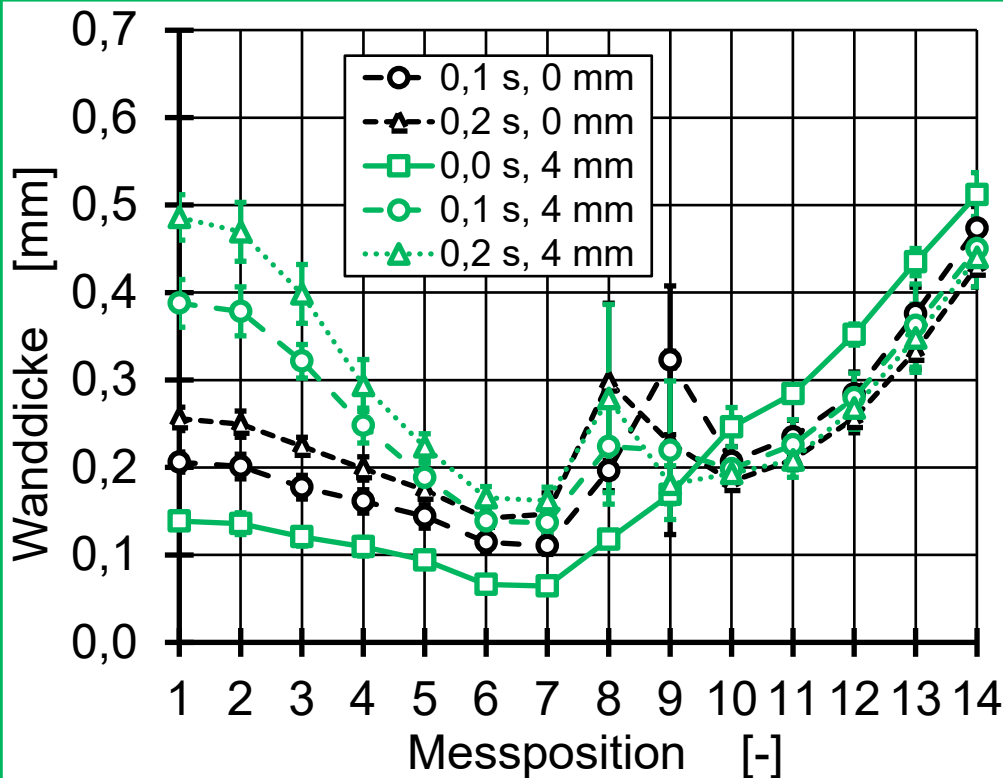


[HBF21b]

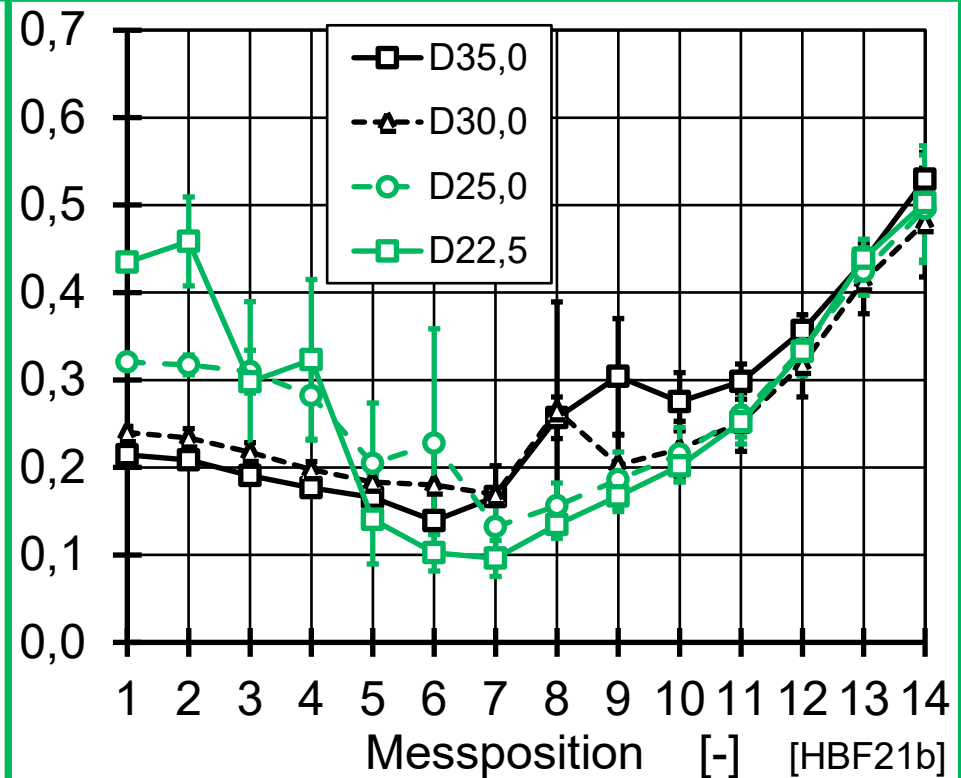
Resultierende Wanddickenverläufe bei Variation von Kontaktzeit, Stempelüberstand sowie Stempeldurchmesser

Stempeltemperatur: 20 °C; Folientemperatur: 120 °C; Material: Polystyrol

Stempeldurchmesser: 35 mm



Kontaktzeit: 0,2 s
Stempelüberstand: 0 mm



Formung ohne Stempelüberstand (0 mm) tritt die Folie erst nach dem Schließvorgang des Werkzeugs mit dem Kühlstempel in Kontakt. Die Abfuhr der Wärme aus der Folie wird somit nur während der Kontaktzeit bis zum Zuschalten der Formluft von 0,1 s bzw. 0,2 s ermöglicht. Die gewählten Kontaktzeiten sind ausreichend lang, um den Verstreckvorgang zu beeinflussen. Die Wanddicken im Bodenbereich von MP 1 bis MP 4 können so erhöht werden. Die lokal herabgesetzten Folientemperaturen führen zu einem veränderten Materialverhalten. Durch die höheren Verstreckwiderstände der gekühlten Bereiche dünnen diese weniger aus. Bei einer geringeren Verstreckung der Bodenbereiche des Formteils (MP 1) aufgrund der geringeren Folientemperaturen in der Halbzeugmitte wird der Wandbereich von MP 10 bis MP 14 erneut stärker verstreckt [HBF21].

Bei einer Erhöhung des Stempelüberstands von 0 mm auf 4 mm wird ein verlängerter Stempelkontakt erzielt. So werden die Folientemperaturen weiter reduziert und die Verstreckwiderstände weiter erhöht. Deutlich dickere Formteilmöden sind das Resultat. Bei einer Foliendicke von ca. 0,5 mm bei einer Kontaktzeit von 0,2 s sowie einem Stempelüberstand von 4 mm ist der Formteilmöden fast doppelt so dick ausgeführt wie bei einer Kontaktzeit von 0,1 s und einem Stempelüberstand von 0 mm [HBF21].

Der geringe Einfluss des Stempelüberstandes ohne eine zusätzliche Formluftverzögerung auf die Wanddickenverteilung wird zur Verdeutlichung ebenfalls die Wanddickenverteilung, die bei einem 4 mm Überstand und einer Kontaktzeit von 0 s zusätzlich dargestellt. Die Wanddickenverteilung ähnelt stark der Wanddickenverteilung des nur mit Formluft geformten Formteils aus Bild 5.2 [HBF21].

Insbesondere an MP 8 und MP 9 sind erneut die Schreckmarken zu erkennen. Die lokalen Verdickungen von bis zu 0,3 mm gegenüber den umliegenden Formteilmöden sind in dem Bereich erneut besonders stark ausgeprägt, an denen der Stempel an der Folie anliegt. Die Schreckmarkenposition und auch die Standardabweichungen der Dicke an den jeweiligen Messpositionen variieren vergleichsweise stark, was darauf zurückzuführen ist, dass die Schreckmarkenposition zwischen den Messpositionen leicht variiert. Im Bereich der Schreckmarken ist der Prozess der aktiven Kühlung somit schwer reproduzierbar. Der Wandbereich des Formteils ist insgesamt vergleichsweise geringfügig beeinflusst. Grund dafür ist, dass dort die Folientemperatur bei allen Prozesseinstellung kaum verändert wird. Die Kühlung erfolgt nur in unmittelbarer Stempelnähe. Die leichten Wanddickenunterschiede im Wandbereich entstehen aufgrund der unterschiedlich starken Verstreckungen im Boden- bzw. Schreckmarkenbereich. Die gleichmäßigste Wanddickenverteilung beim Einsatz eines Stempeldurchmessers von 35 mm resultiert bei einer Kontaktzeit von 0,2 s und einem Stempelüberstand von 0 mm. Die maximale Wanddickendifferenz zwischen der dicksten und dünnsten Stelle des Formteils beträgt 0,288 mm. Die inhomogenste Wanddickenverteilung

mit der größten Wanddickendifferenz ergibt sich bei 0 s Kontaktzeit und einem Stempelüberstand von 0 mm. Da die Verstreckung ähnlich einer freien Verstreckung der Folie ohne Verstreckhilfen ähnelt, wird insbesondere der Übergangsbereich zwischen Formteilm Boden und -wand besonders stark verstreckt. So entsteht eine besonders große Wanddickendifferenz [HBF21].

Insgesamt konnte gezeigt werden, dass insbesondere die Verzögerungszeit in Kombination mit dem Stempelüberstand eine Anpassung der Wanddickenverteilung mittels lokaler aktiver Kühlung ermöglicht. Während bei einer konventionellen Umformung nur mit Formluft eine minimale Wanddicke an MP 6 bzw. 7 von ca. 0,07 mm entsteht und zu einer maximalen Wanddickendifferenz von über 0,49 mm führt, konnte die Wanddickendifferenz durch eine geeignete Prozesseinstellung auf 0,288 minimiert (minimale Wanddicke: 0,16 mm) und das Formteil somit homogenisiert werden.

8.3 Einfluss des Kühlstempeldurchmessers auf die Wanddickenverteilung

Neben der Prozesseinstellung weist auch der Durchmesser der Kühlstempel einen Einfluss auf die Wanddickenverteilung auf, wie bereits bei den Ergebnissen aus den Simulationen in Kapitel 7 zu erkennen ist. Die Schreckmarkenposition konnte durch die Änderung des Stempelradius beeinflusst oder minimiert werden, wenn durch Anpassung des Stempeldurchmesser andere Verstreckbedingungen erzeugt werden. In Bild 8.3, rechts, sind die Wanddickenverteilungen beim Einsatz von verschiedenen Stempeldurchmessern dargestellt. Die Durchmesser wurden von 22,5 mm bis 35 mm in 2,5 mm Schritten variiert. Der Stempelüberstand betrug 0 mm und die Kontaktzeit 0,2 s, da sich so in den zuvor durchgeführten Untersuchungen die homogenste Wanddickenverteilung ergab. Mit abnehmenden Stempeldurchmesser werden die Halbzeugbereiche in der Nähe des Zentrums stärker gekühlt und daher beim Ausformen weniger verstreckt. Der Bodenbereich beim Einsatz eines Kühlstempels mit einem Durchmesser von 22,5 mm zeigte jedoch erneut, dass die Positionierung der Schreckmarke und die leichten Verformungen der Folie im Kontaktbereich des Stempels mit der Folie während der Umformung schwer zu reproduzieren waren. Die Wanddicke an MP 1 in der Bodenmitte des Formteils liegt beim Einsatz eines Durchmessers von 22,5 mm bei ca. 0,45 mm und ist somit besonders dick ausgeprägt. Anschließend nimmt die Wanddicke stark bis zum Übergangsbereich von MP 6 bis 7 ab. Der Übergangsbereich wird wie auch bei reiner Formluftzuschaltung stark ausgedünnt, wodurch ersichtlich wird, dass der Kühlstempeldurchmesser von 22,5 mm zur Erzeugung einer vergleichmäßigsten Wanddickenverteilung nicht geeignet ist. Die homogensten Wanddickenverteilungen resultieren beim Einsatz der Stempel mit den Durchmessern von 27,5 mm bzw. 30,0 mm. Die maximalen Wanddickendifferenzen betragen 0,311 mm

(Durchmesser: 30 mm) sowie 0,330 mm (Durchmesser: 27,5 mm). Die gekühlten Bereiche entsprechen den Bereichen, die bei der Verstreckung in den stark verstreckten Formteilmereichen resultieren. Die Wanddicken im Übergangsbereich von MP 6 und MP 7 (ca. 0,18 mm) werden gegenüber der reinen Formluftumformung (ca. 0,07 mm) mehr als verdoppelt. Die Bereiche von MP 11 bis MP 14 des Formteils verbleiben vergleichsweise dick, da diese der freien Verstreckung ohne Temperatureinfluss unterliegen [HBF21]. Der Einsatz von Kühlstempel mit Kreisringen, die eine Vertiefung im Bodenbereich und daher keine planare Fläche aufweisen, wurden ebenfalls untersucht. Durch den Foliendurchhang weist das Innere des Kühlstempel keinen signifikanten Einfluss auf die Temperaturprofile und somit die Wanddickenverteilungen auf, sodass diese Ergebnisse nicht erneut dargestellt werden.

Es konnte gezeigt werden, dass die Wanddickenverteilung weiterhin durch die Änderung des Stempeldurchmessers beeinflusst werden kann. In weiteren Untersuchungen wird der Einfluss der Stempelgeometrie untersucht, um die Schreckmarken im Formteilmereichen nach Möglichkeit zu minimieren. Dazu werden Beschichtungen eingesetzt, die das Abgleiten der Folie vom Stempel verbessern und so die Schreckmarkenbildung minimieren sollen. Zusätzlich werden an den Stempeln Radien vorgesehen, die den Bereich des Erstkontakts mit der Folie vergrößern, sodass die Kühlung nicht punktuell, sondern flächiger erzeugt wird. Somit wird die Kontaktfläche erhöht, wodurch die sich sonst sehr lokal bildende Schreckmarke vermieden werden soll. Für die weiteren Untersuchungen wurden die Stempel gewählt, bei denen der Stempeldurchmesser von 35 mm sowie die Prozesseinstellungen (0,2 s Kontaktzeit, 0 mm Stempelüberstand) zu den homogensten Wanddickenverteilung führten. Auf Basis dieses Stempels erfolgten die Anpassung der Stempelgeometrie mit Verrundungsradien sowie die Änderung der Oberflächenbeschaffenheit durch das Aufbringen einer PTFE-Beschichtung, die die Interaktion zwischen Kühlstempel und Folie beeinflusst.

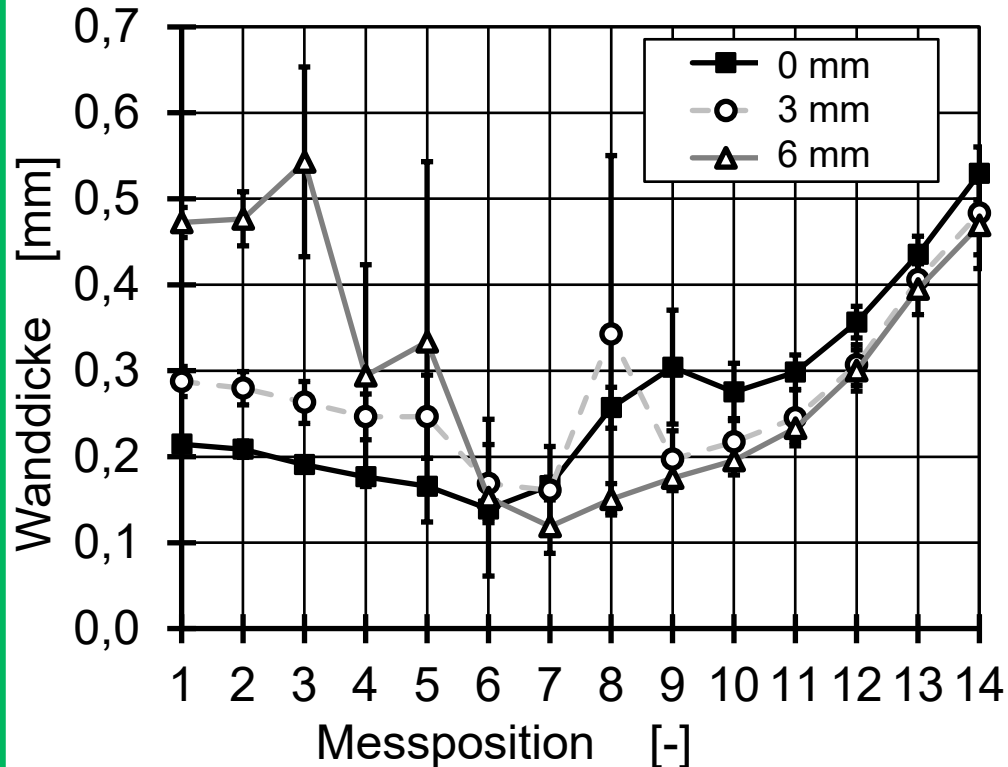
8.4 Einfluss des Kühlstempelverrundungsradius auf die Wanddickenverteilung

Der Einfluss des Kühlstempelverrundungsradius von 0 mm, 3 mm und 6 mm ist in Bild 8.4 am Beispiel von zwei verschiedenen Kühlstempelnenddurchmessern dargestellt. Bei einem Kühlstempeldurchmesser von 35 mm (Bild 8.4, links) fällt insbesondere der Bodenbereich des Formteils dicker aus, da durch den angebrachten Radius die Kontaktfläche kleiner wird, mit der die Folie zu Beginn der Kühlung in Kontakt tritt. Dies führt zu einer verstärkten Kühlung der inneren Folienbereiche, die nach der Verstreckung im Boden des Formteils resultieren. Eine Zunahme des Verrundungsradius ähnelt daher einer Verkleinerung des Stempeldurchmessers ohne Radius. Die Wanddicke im Boden bei einem 6 mm Radius ist mit bis zu 0,53 mm (MP 3) besonders dick ausgeführt und fällt anschließend Richtung MP 6 und

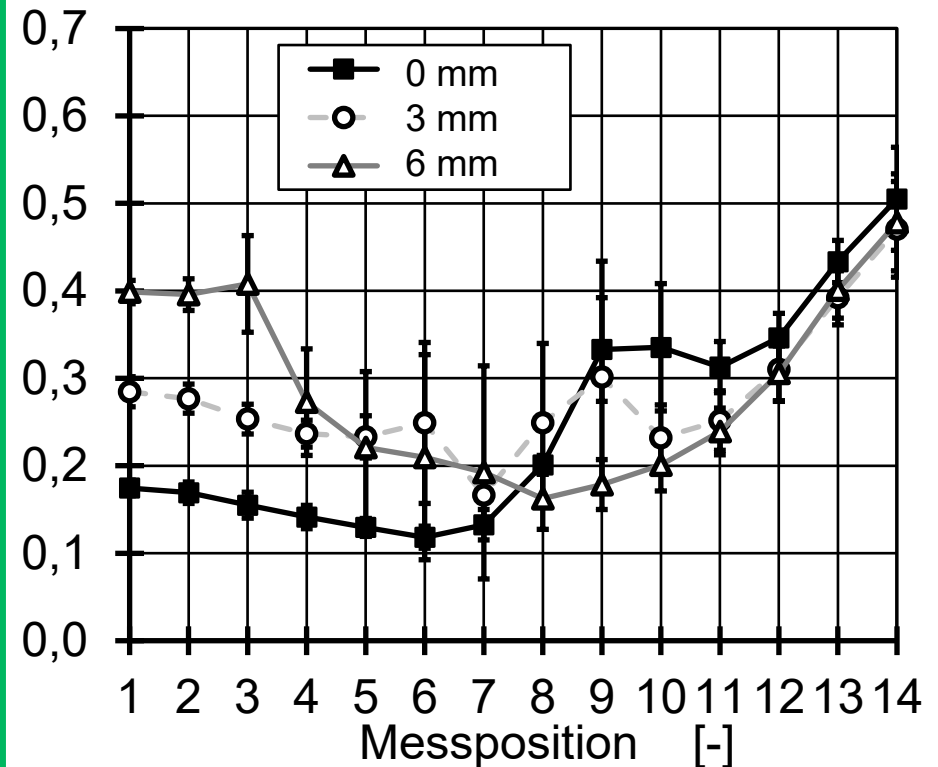
Einfluss von Verrundungsradien am Kühlstempel auf die Wanddickenverteilung

Stempeltemperatur: 20 °C; Folientemperatur: 120 °C;
 Kontaktzeit: 0,2 s; Material: Polystyrol

Stempelnenddurchmesser: 35 mm



Stempelnenddurchmesser: 37,5 mm



7 im Übergangsbereich zwischen Boden und Wand auf bis zu 0,11 mm (MP 7) stark ab. Im Formteilmittelbereich von MP 1 bis MP 7 sind weiterhin die Standardabweichungen besonders groß, was verdeutlicht, dass es im Kontaktbereich herausfordernd ist, reproduzierbare Kontaktbedingungen zu erzeugen. Zurückgeführt wird dies auf Haft- und Gleitreibungsunterschiede bei den einzelnen Formungen, die sich bereits aufgrund von leichten Unterschieden im Folienkontakt bzw. leichten Unterschieden in der Folientemperatur zurückführen lassen [CHM02, MMH+12]. In Bild 8.4. rechts, ist der Einfluss des Verrundungsradius bei einem Stempeldurchmesser von 37,5 mm dargestellt. Durch den größeren Stempelnenndurchmesser wird der Verjüngung durch den angebrachten Verrundungsradius entgegengewirkt. Deutlich zu erkennen ist erneut, dass der Formteilmittelbereich mit zunehmenden Kühlstempelkantenradius dicker ausfällt, weil die Erstkontaktfläche verkleinert wird. Bei beiden Stempeldurchmessern führt ein dickerer Bodenbereich erneut zu einer stärkeren Verstreckung des Wandbereichs der Formteile. Die maximalen Wanddickendifferenzen sind bei beiden Stempeldurchmessern von 35 mm sowie 37,5 mm am geringsten und betragen in beiden Fällen 0,31 mm. Die dünnsten Wanddicken an MP 6 und 7 betragen 0,16 mm (Durchmesser 35 mm) sowie 0,17 mm (Durchmesser 37,5 mm). Prinzipiell kann eine Reduktion der Schreckmarkenbildung durch einen Kontakt der Folie mit einem angebrachten Radius nicht erzielt werden. Die Änderung des Radius führt hauptsächlich zu einer veränderten Stempelfläche, woraus veränderte Kühlbedingen resultieren, die den gesamten Verlauf der Wanddickenverteilung beeinflussen und nicht nur die Schreckmarken vermeiden.

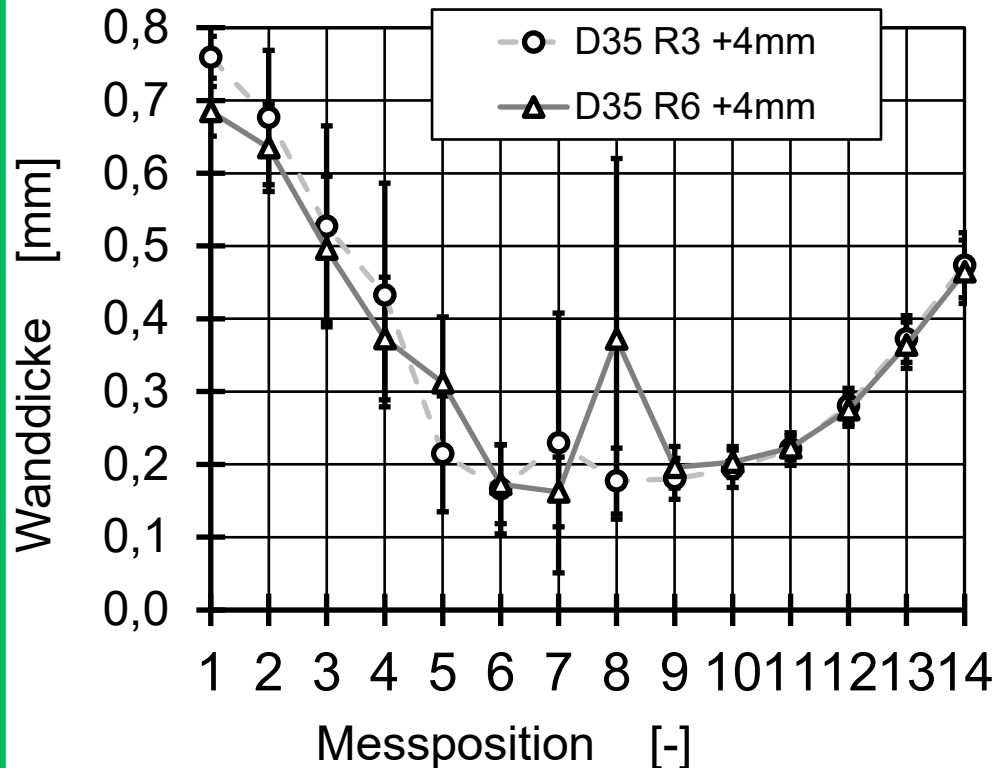
8.5 Einfluss einer PTFE-Stempelbeschichtung sowie der Einfluss von Kupferkühlstempeln auf die Wanddickenverteilung

In Bild 8.5 ist der Einfluss der Kühlstempel auf die Wanddickenverteilung dargestellt, die ohne (links) und mit PTFE (rechts) beschichtet wurden. Durch die veränderte Oberflächenrauigkeit wird eine veränderte Kühlstempel-/Folieninteraktion erwartet, die dazu führt, dass das Material einfacher vom Kühlstempel abgleiten bzw. abgezogen werden kann. Die Kühlstempeltemperatur betrug erneut 20 °C. Bei 0 mm Stempelüberstand konnte kein Einfluss auf die Wanddickenverteilung festgestellt werden. Erst bei einem Stempelüberstand, bei dem eine Verstreckung der Folie durch den Kühlstempel erfolgt und diese über den Kühlstempel abgleitet, wird der Einfluss erkennbar. Aus diesem Grund wird der Einfluss der PTFE-Beschichtung bei einem Stempelüberstand von 4 mm sowie bei Verwendung von verschiedenen Stempelkantenradien dargestellt. Der Kühlstempeldurchmesser beträgt 35 mm. Bei der Erhöhung des Stempelüberstand von 0 mm auf 4 mm und zusätzlich angebrachten Verrundungsradien von 3 mm und 6 mm wird der Bodenbereich besonders wenig verstreckt. Mit fast 0,8 mm Dicke weist das Formteil fast Ausgangsfoliendicke an MP 1 auf. Die

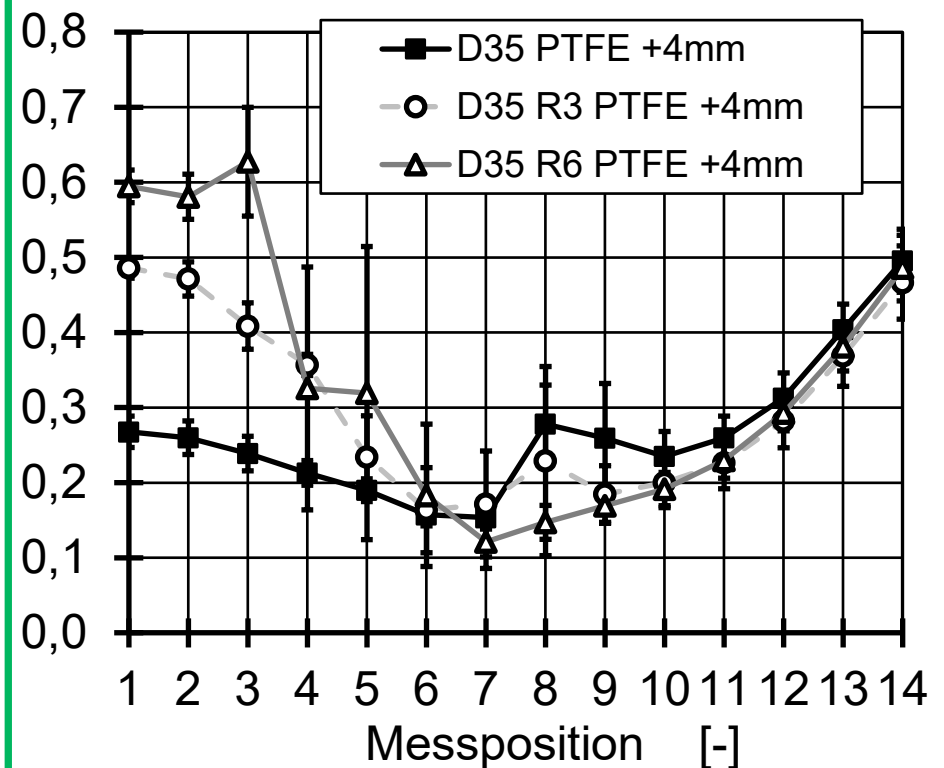
Einfluss der PTFE-Beschichtung der Stempel auf die Wanddickenverteilung

Stempeltemperatur: 20 °C; Folientemperatur: 120 °C;
 Kontaktzeit: 0,2 s; Material: Polystyrol

Ohne PTFE-Beschichtung



Mit PTFE-Beschichtung



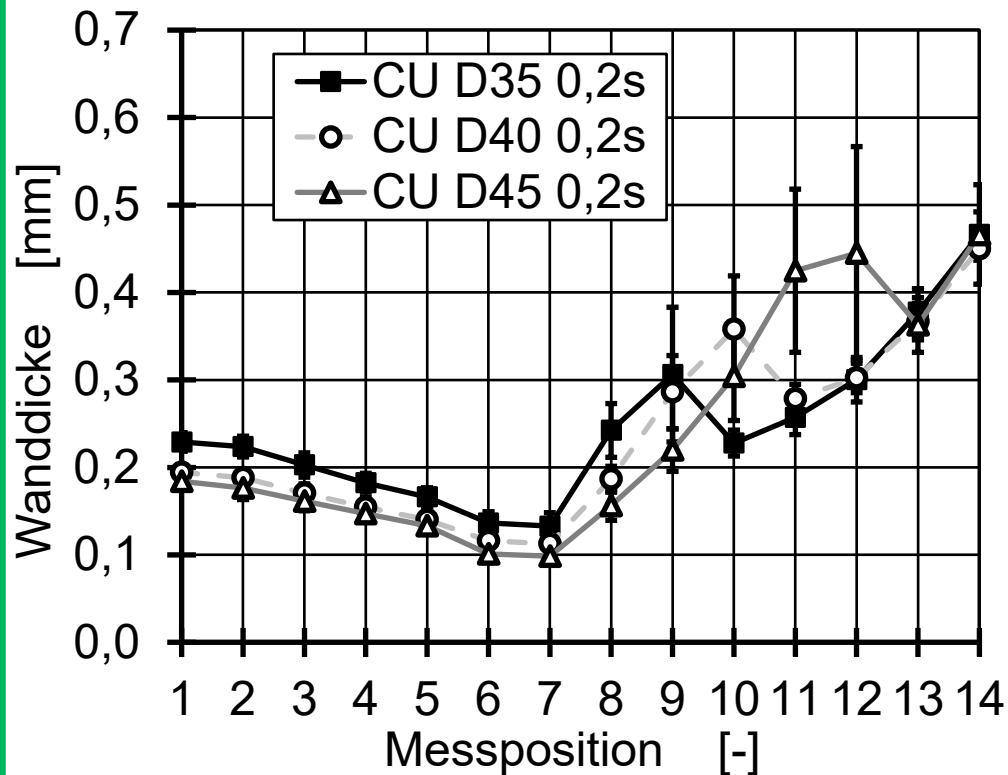
Folientemperatur wurde lokal soweit abgesenkt, dass die Verstreckung nur in den umliegenden noch einfacheren zu verstreckenden Folienbereichen erfolgt. Sowohl bei Radien von 3 mm als auch 6 mm sinkt die Wanddickenverteilung stark auf bis zu ca. 0,15 mm ab (MP 7). Anschließend steigt sie zum Bereich des Formteilrands an MP 14 wieder kontinuierlich an. Wieso bei einem Stempelkantenradius von 6 mm an MP 8 die vergleichsweise starke Schreckmarke entsteht, konnte nicht abschließend geklärt werden. Allerdings sind die Standardabweichungen erneut im Bereich des Folienkontakts mit dem Kühlstempel besonders groß, was erneut die geringe Reproduzierbarkeit des Prozesses hervorhebt. Nach der Beschichtung der Kühlstempel mit PTFE ergaben sich leicht veränderte Wanddickenverteilungen (Bild 8.5, rechts). Bei beiden Kühlstempelradien sinkt die Wanddicke an MP 1 um ca. 0,1 mm bis 0,25 mm. Dies zeigt, dass durch die PTFE-Beschichtung das Material im Kontaktbereich einfacher vom Stempel abgleiten kann und so einfacher verformbar ist. Die Verstreckung im Kontaktbereich wird vereinfacht, da die geringere Haft- bzw. Gleitreibungskräfte überwunden werden müssen. Durch die PTFE-Beschichtungen wurde jedoch nur eine geringfügige Anpassung der Wanddickenverteilungen erzielt. Die maximale Wanddickendifferenzen mit und ohne PTFE-Beschichtungen betragen 0,58 mm bzw. 0,47 mm und sind mit PTFE-Beschichtung somit leicht homogener. Eine Anpassung der gesamten Wanddickenverteilung muss jedoch weiterhin durch die Änderung des Stempeldurchmessers sowie -kantenradius in Kombination mit der Kontaktzeit durchgeführt werden.

Gleiches gilt für den Einsatz von Kupferkühlstempeln. Die Kupferkühlstempel, deren Einfluss auf die Wanddickenverteilung in Bild 8.6 bei einer Kontaktzeit von 0,2 s dargestellt ist, änderten die Wanddickenverteilungen gegenüber den Aluminiumstempeln ebenfalls nur geringfügig. Sowohl die Stempelgeometrieänderung als auch die Änderung des Prozesseinstellungen in Bezug auf den Kühlstempelüberstand zeigten die gleichen Effekte wie bei Verwendung der Aluminiumstempel. Mit kleinerem Kühlstempeldurchmesser werden die Bereiche, die weniger verstreckt werden, in die Richtung der Formteilmittte verlagert. Überraschenderweise führt jedoch die Erhöhung des Stempelüberstands nicht zu einer ausgeprägten Erhöhung der Wanddicken im Bodenbereich an MP 1 wie dies bspw. beim Einsatz der Aluminiumstempel in Bild 8.3 zu erkennen ist. Dieses Ergebnis ist widersprüchlich, da Kupfer eine größere Wärmeleitfähigkeit von ca. 401 W/mK gegenüber Aluminium mit ca. 236 W/mK aufweist. Entsprechend müsste die Kühlung im Kontaktbereich zwischen Kupferstempel und Folie verstärkt werden, was jedoch nicht der Fall war. Abschließend geklärt werden konnte dieser Umstand auch nach Wiederholungsversuchen nicht. An dieser Stelle sind somit weitere Untersuchungen notwendig.

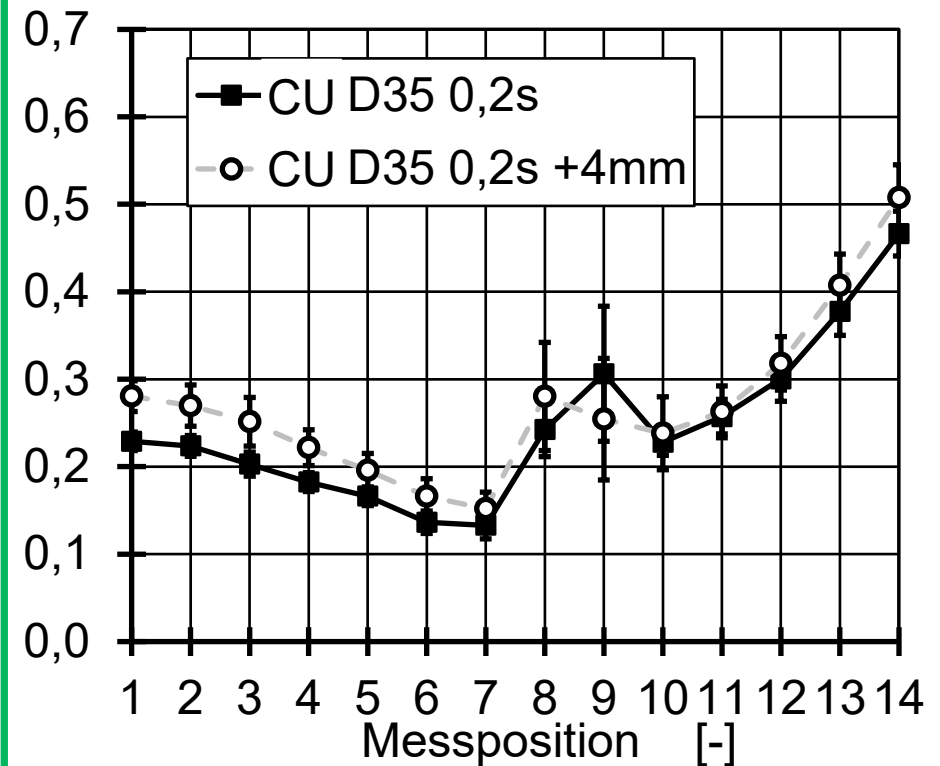
Einfluss von Kupfer-Kühlstempeln auf die Wanddickenverteilung

Stempeltemperatur: 20 °C; Folientemperatur: 120 °C;
Kontaktzeit: 0,2 s; Material: Polystyrol

Geometrievariation



Variation Stempelüberstand



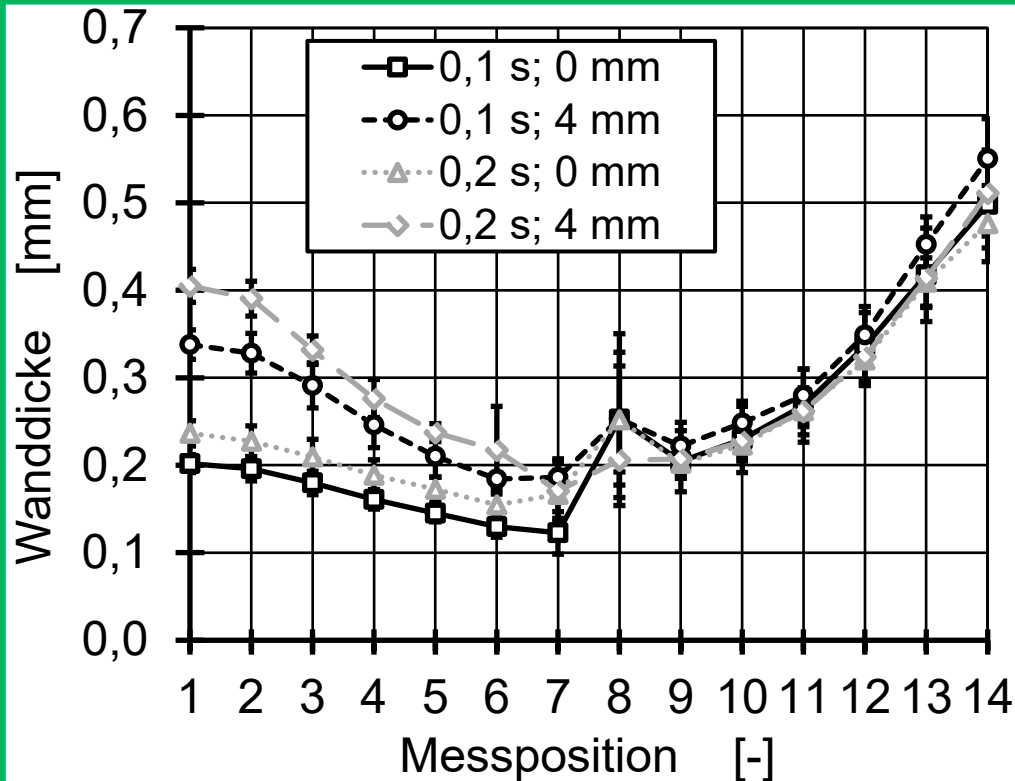
8.6 Einfluss der Folientemperatur auf die Wanddickenverteilung

In Bild 8.7 ist der Einfluss der Folientemperatur auf die Wanddickenverteilung dargestellt. Durch eine erhöhte Folientemperatur ist die Temperaturdifferenz zwischen Kühlstempel und Folie größer, sodass eine vergrößerte Wärmeabfuhr (vgl. Gl. 3.1) aus der Folie zu erwarten ist. Daher sollte der Einfluss der Kühlstempel zunehmen. Die Untersuchungen erfolgten im Anschluss an die Untersuchungen des Einflusses des Stempeldurchmessers auf die Wanddickenverteilung (Bild 8.3). Ausgewählt wurde der Kühlstempel mit einem Stempeldurchmesser von 30 mm, der zu der homogensten Wanddickenverteilung führte. So kann geprüft werden, ob durch die Anpassung des Stempeldurchmessers die Wanddickenverteilung weiter homogenisiert werden kann. Die Kühlstempeltemperatur betrug 20 °C. Bei den Untersuchungen wurden die Kontakt- bzw. Verzögerungszeiten bis zum Zuschalten der Formluft sowie der Stempelüberstand variiert. Durch die Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass die Folientemperatur neben der Kontaktzeit zwischen Folie und Kühlstempel einen signifikanten Einfluss auf die Wanddickenverteilung aufweist. Es fällt auf, dass bei einer Folientemperatur von 110 °C und 130 °C veränderte Wanddickenverteilungen auftreten, die sich insbesondere in der Ausprägung der Formteilbodendicke unterscheiden. Bei einer Folientemperatur von 110 °C ist bei 0,2 s Kontaktzeit sowie einem Stempelüberstand von 4 mm die Wanddicke an MP 1 ca. 0,4 mm. Bei einer Folientemperatur von 130 °C und sonst gleichen Prozesseinstellungen beträgt die Foliendicke lediglich ca. 0,24 mm, wobei der gesamte Wanddickenverlauf eher dem einer freien Verstreckung ohne Einsatz der aktiven Kühlung ähnelt (vgl. Bild 5.2). Die kleinsten maximalen Wanddickendifferenzen betragen 0,38 mm bei einer Folientemperatur von 110 °C sowie 0,4 mm bei einer Folientemperatur von 130 °C. Die dazugehörige minimale Wanddicke an MP 6 bzw. 7 ist bei 110 °C mit 0,17 mm gegenüber einer Dicke von 0,11 mm bei 130 °C ebenso leicht verbessert. Die verschieden starken Einflüsse auf die Wanddickenverteilung bzw. die maximale Wanddickendifferenz können auf das stark nichtlineare temperaturabhängige Materialverhalten zurückgeführt werden. Bei einer hohen Folientemperatur wird die Folie zwar gekühlt, die Wärmeabfuhr reicht jedoch nicht aus, um die Temperatur lokal so stark abzusenken, dass die Verstreckwiderstände signifikant beeinflusst werden. Dies ist in Bild 3.1, links, exemplarisch dargestellt. Die Verstreckwiderstände bzw. Spannungen unterscheiden sich bei steigenden Folientemperaturen weniger als bei niedrigeren (bspw. im Glasübergangsbereich bei PS). Wird eine Folientemperatur von 110 °C gewählt, werden die Verstreckwiderstände somit stärker beeinflusst, da das Materialverhalten in diesem Temperaturbereich stärker temperaturabhängig ist. Die Ausprägungen der Wanddickenverteilungen bei Verwendung von 120 °C liegen zwischen den beiden dargestellten Temperaturen und werden daher nicht erneut

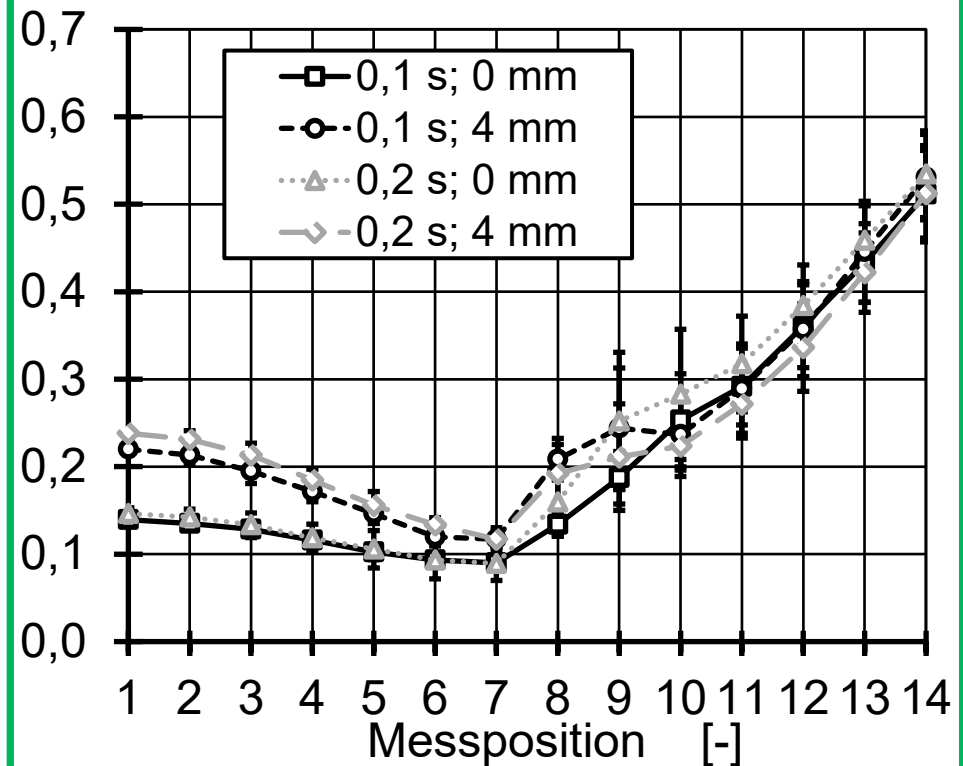
Einfluss der Folientemperatur auf die Wanddickenverteilung

Stempeltemperatur: 20 °C; Stempeldurchmesser: 30 mm;
Material: Polystyrol

Folientemperatur: 110 °C



Folientemperatur: 130 °C



dargestellt. So konnte festgestellt werden, dass bei einer Erhöhung der Folientemperatur zur bspw. besseren Abformgenauigkeit lokaler Formteilbereiche die Verzögerungszeit bis zum Zuschalten der Formluft erhöht werden muss, da die eingebrachten Temperaturunterschiede durch den Kühlstempel auf der Folie zu nicht ausreichend großen Änderungen der Verstreckwiderständen führen. Bei niedrigeren Folientemperaturen ist der Einfluss der Kontaktzeit zwischen Folie und Stempel bis zum Zuschalten der Formluft höher, da eine stärkere Änderung der Dehnviskosität bei lokal veränderter Temperatur vorliegt.

8.7 Einfluss der Foliendicke auf die Wanddickenverteilung

Der Einfluss der Foliendicke auf den Prozess der Temperaturprofilierung ist insbesondere für Verpackungsanwendungen von besonderer Bedeutung, da eine lokal ringförmige Kühlung möglichst schnell erfolgen muss, um die Zykluszeit nicht zu verlängern. In Bild 8.8 sind die Thermografieaufnahmen beim Einsatz einer Foliendicke von 1,2 mm anstatt der bisher verwendeten 0,8 mm dargestellt. Die Kontaktzeit zwischen Folie und Kühlstempel musste aufgrund der erhöhten Foliendicken verlängert werden, um ausreichend Wärme aus der Folie in den Stempel leiten zu können, sodass andere Wanddickenverteilungen resultierten. Weiterhin ist zu erkennen, dass bei einer verlängerten Kontaktzeit die Abbildegenauigkeit der Kühlstempelgeometrie auf der Folie reduziert wird. Die Temperaturprofile weisen insbesondere bei verlängerten Kontaktzeiten Asymmetrien auf. Diese Asymmetrien sind auf leicht veränderte, nicht konzentrische Kontaktbedingungen zurückzuführen, die sich wiederum durch den Folienverzug während des Kühlens durch den Kühlstempel erklären lassen. Prinzipiell ist eine Kühlung der Folie jedoch möglich, sodass die Wanddickenverteilungen angepasst werden können. Die zugehörigen Wanddickenverteilungen, die bei der Ausformung der 1,2 mm dicken Folie auftreten, sind in Bild 8.9 dargestellt. Wie bereits zuvor gezeigt, führt eine verlängerte Kontaktzeit zu einem dickeren Bodenbereiche der Formteile. Auch die Dünnstelle an MP 6 und 7 kann durch den Einsatz der aktiven Kühlung bei einer dickeren Folienausgangsdicke von 0,12 mm auf 0,19 mm verbessert werden. Die maximale Wanddickendifferenz ist bei der Kontaktzeit von 2 s ebenfalls mit 0,40 mm gegenüber einer Kontaktzeit von 0 s mit 0,577 verbessert. Der Wandbereich wird erneut dünner ausgeführt, je dicker der Bodenbereich ist. Auf die genauen Wanddickenverteilungen wird nicht erneut eingegangen, da diese denen beim Einsatz einer 0,8 mm Folie ähneln und die Erklärungsansätze gleich sind.

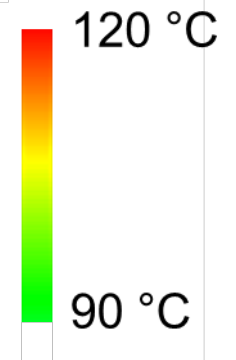
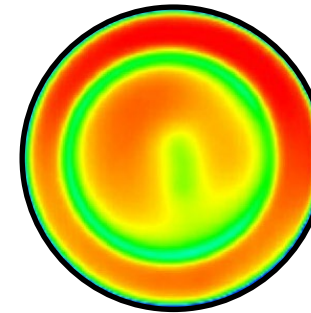
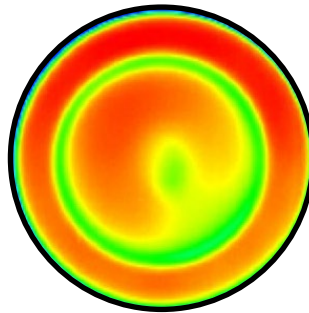
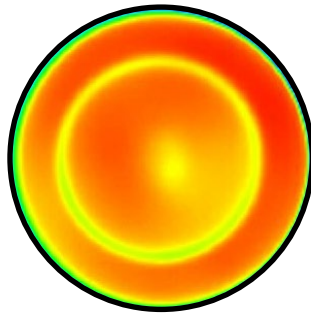
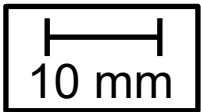
Die Ungleichmäßigkeiten der Temperaturprofile auf der Folie zeigt jedoch die große Herausforderung der aktiven Kühlung im Thermoformen auf. Die Erzeugung von reproduzierbaren Kontaktbedingungen ist insbesondere bei kleinen Kontaktflächen, die bei geringen Stempeldurchmessern entstehend sowie bei langen Kontaktzeiten bei dickeren

Einfluss der Foliendicke auf die Temperaturprofile

Kontaktzeit: 0 s
Stempelüberstand: 0,0 mm

1 s
0,0 mm

2 s
4,0 mm



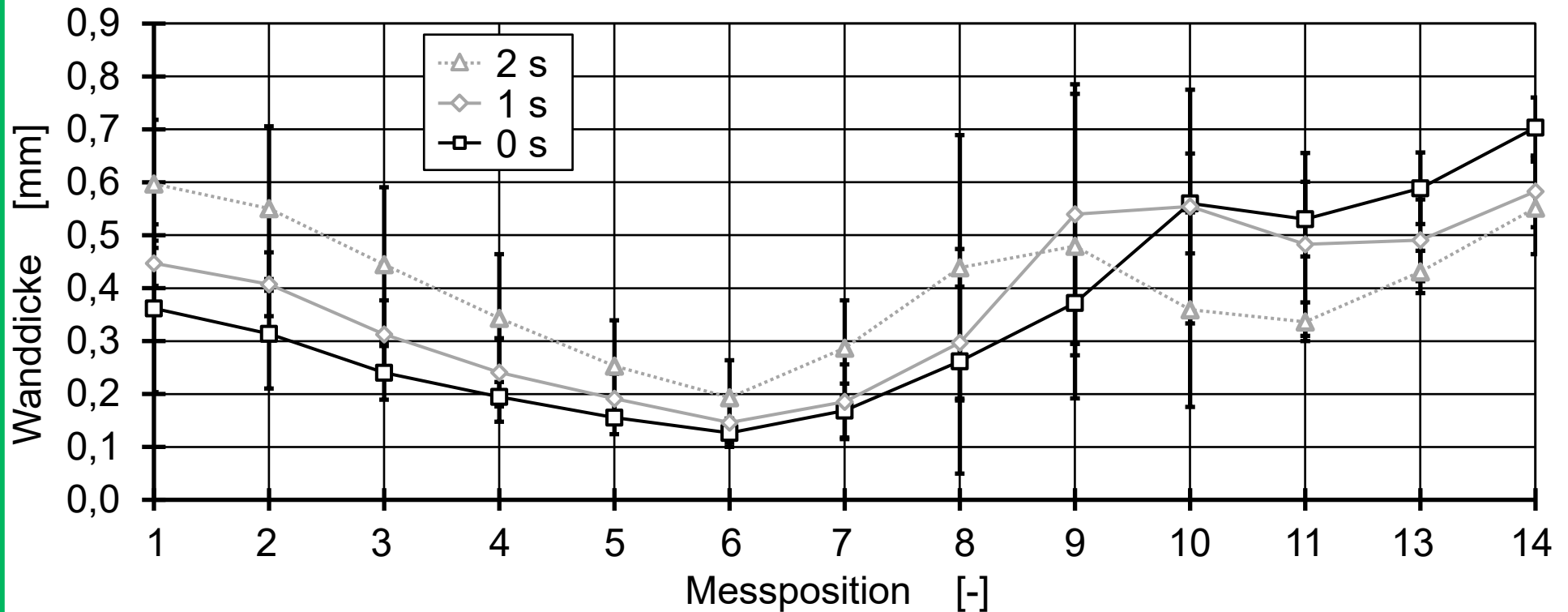
Folienmaterial: Polystyrol
Foliendicke: 1,2 mm
Stempeldurchmesser: 35 mm
Folientemperatur: 120 °C
Stempeltemperatur: 20 °C
Messmethode: Infrarotkamera

[HBF21b]

Einfluss der Foliendicke auf die Wanddickenverteilung

Stempeltemperatur: 20 °C; Folientemperatur: 120 °C;
Kontaktzeit: 0,2 s; Material: Polystyrol

Stempeldurchmesser: 35 mm



Folien schwierig. Aus diesem Grund wurde ein weiterer Ansatz untersucht, die Kontaktbedingung zwischen Kühlstempel und Folie zu verbessern.

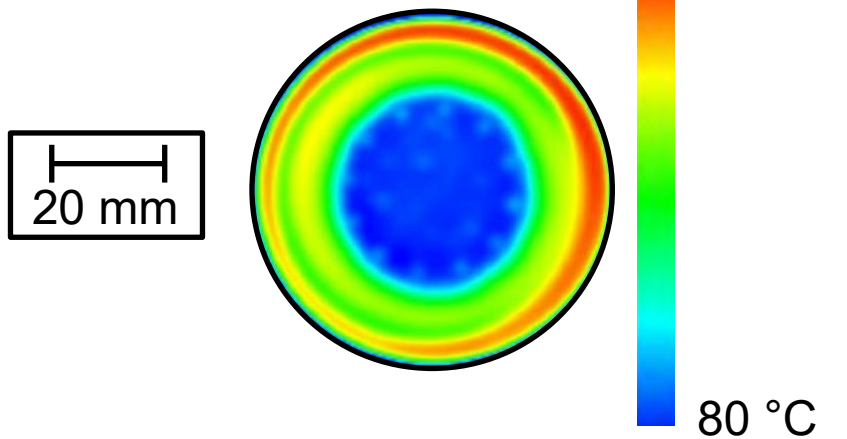
8.8 Einfluss eines Vakuums zur Verstärkung des Kontakts zwischen Kühlstempel und Folie

Zur Verbesserung der Kontaktbedingungen zwischen Kühlstempel und Folie wurden in einem Stempel mit einem Durchmesser von 35 mm zwölf Bohrungen im Stempelboden (Teilkreisdurchmesser: 25 mm) eingebracht, an die ein Vakuum angelegt wurde. Das Vakuum saugt die Folie an den Kühlstempel und erzeugt einen definierten Kontakt zwischen beiden Kontaktpartnern, wodurch die Wärmeabfuhr erhöht sowie die Reproduzierbarkeit der Kühlung und somit der Wanddickenverteilung verbessert wird. In Bild 8.10 ist exemplarisch eine Thermografieaufnahme der temperaturprofilierten 1,2 mm dicken Folie dargestellt. Besonders deutlich ist der stark abgesenkte Temperaturbereich in der Mitte der Folie zu erkennen. Durch das Ansaugen der Folie wurde deutlich mehr Wärme entzogen. Bei der Prozessführung war jedoch herausfordernd, dass ein zeitliches Ansteuern des Vakuums von der Thermoformanlage nicht unterstützt wird. Dies führte dazu, dass die Folie bereits kurz vor dem Schließen des Werkzeugs an den Kühlstempel gesaugt wurde, sodass keine kürzere Kontaktzeit als 1 s erzielt werden konnte. Erneut ist bei einer dickeren Folie von 1,2 mm ein nicht rotationssymmetrisches Temperaturprofil mit unterschiedlichen Folientemperaturen über dem Umfang zu erkennen. Diese Temperaturasymmetrien führen aufgrund der veränderten Verstreckwiderstände auch zu lokal unterschiedlichen Wanddicken über der Formteillumfang. Wie in Bild 8.10 ebenfalls dargestellt, ist die Wanddicke an MP 1 erneut besonders groß, da die Temperatur in diesem Bereich mit 80 °C besonders niedrig war und das Material daher kaum verstreckt wurde und noch fast die Ausgangsdicke der Folie von 1,2 mm aufwies. Die anderen Formteilmbereiche werden hingegen aufgrund der geltenden Volumenkonstanz besonders stark ausgedünnt. Die maximale Wanddickendifferenz beträgt 0,98 mm und ist stark gegenüber den Wanddickenverteilungen der Formteile, die ebenfalls mit einer Folie von 1,2 mm Dicke jedoch ohne Vakuum geformt wurden (Kapitel 8.7). Die minimale Wanddicke an MP 7 beträgt 0,15 mm. Für weiterführende Untersuchungen wird empfohlen, ein Vakuumsystem in die Anlagensteuerung zu integrieren, das zeitlich über die Maschinen- und Anlagentechnik angesteuert werden kann, sodass auch kürzere Kontaktzeiten als 1 s reproduzierbar eingestellt werden können. Fraglich ist, ob dies die entstehenden Asymmetrien durch geringfügige minimale Ausrichtungsfehler der Werkzeugkomponenten sowie Schwindung und Verzug der Folie vermeidet.

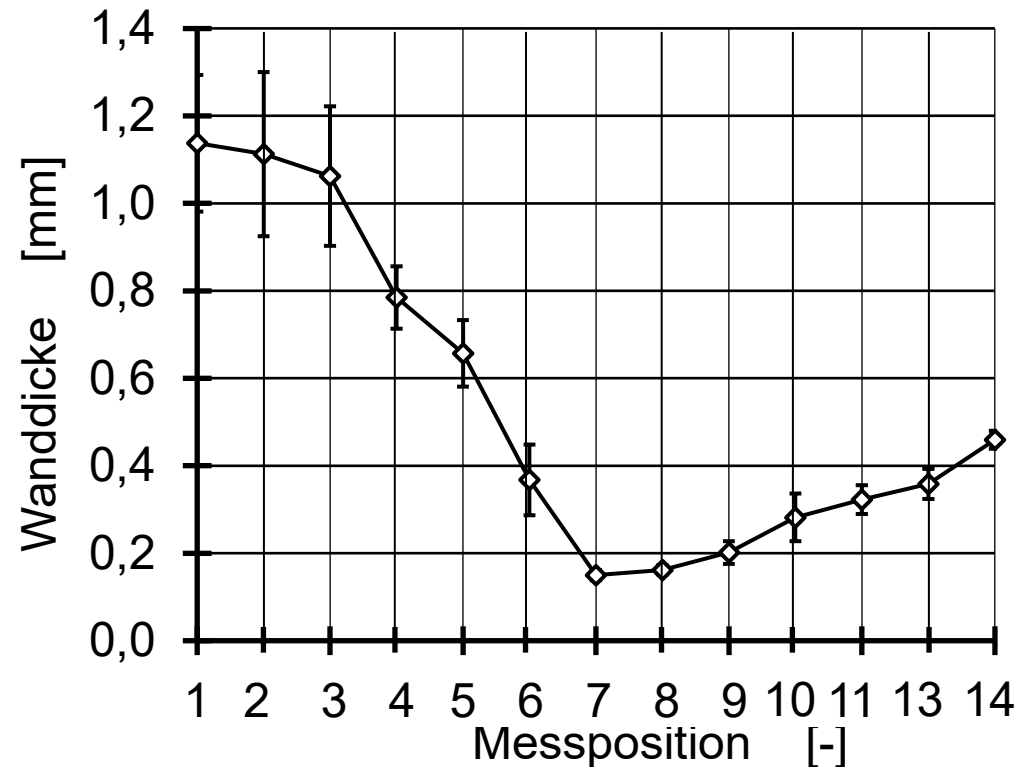
Einfluss des Vakuums auf die Temperaturprofilierung und die resultierende Wanddickenverteilung

Stempeltemperatur: 20 °C; Folientemperatur: 120 °C;
Kontaktzeit: 1 s; Material: Polystyrol

Thermografieaufnahme



Wanddickenverteilung



8.9 Zusammenfassung der minimalen Wanddicke sowie der maximalen Wanddickendifferenzen bei verschiedenen Stempelgeometrien sowie Prozesseinstellungen

Zur verbesserten Übersichtlichkeit sind in Tabelle 8.1 die in den jeweiligen Unterkapiteln 8.1 bis 8.3 beschriebenen minimalen Wanddicken (MIN) sowie die dazugehörige MP sowie maximale Wanddickendifferenzen (MWD) der durchgeführten Hauptuntersuchungen zusammengefasst, die beim Einsatz der PS-Folien mit einer Dicke von 0,8 mm sowie einer Stempeltemperatur von 20 °C resultieren:

	Kühlstempel sowie Prozesseinstellungen				
	Durchmesser 35/40/45	Durchmesser 35 + 4 mm + 0 s	Durchmesser 35 + 0 mm + 0,2 s	Durchmesser 35 + 4 mm + 0,2 s	Durchmesser 25/30 + 0 mm + 0,2 s
MIN	0,09 mm (MP 6)/ 0,08 mm (MP 7)/ 0,07 mm (MP 7)	0,06 mm (MP 7)	0,14 mm (MP 7)	0,16 mm (MP 7)	0,13 mm (MP 7)/ 0,17 mm (MP 7)
MWD	0,50 mm/ 0,47 mm/ 0,45 mm	0,45 mm	0,30 mm	0,32 mm	0,37 mm/ 0,31 mm
Unter- kapitel	Kap.: 6.2	Kap.: 8.2	Kap.: 8.2	Kap.: 8.2	Kap.: 8.3
	Ausgangssituation	Variation Stempel- überstand	Variation Kontaktzeit	Variation Stempel- überstand + Kontaktzeit	Variation Stempel- durchmesser bei opt. Kontaktzeit

Tabelle 8.1: Übersicht über die minimale Wanddicke sowie die maximale Wanddickendifferenz bei verschiedenen Prozesseinstellungen

Da die Wanddickenverteilungen durch den Einsatz von PTFE-beschichteten Stempeln sowie durch die Änderung des Kühlstempelmaterials nur geringfügig beeinflusst wurden, wird auf diese in der Tabelle nicht eingegangen. Die Einbringung eines Radius an der Stempelkante führt zu mit Reduktion des Stempeldurchmessers identischen Effekten, während für abweichende Folientemperaturen und Foliendicken kein sonderlich sinnvoller Vergleich mehr möglich ist.

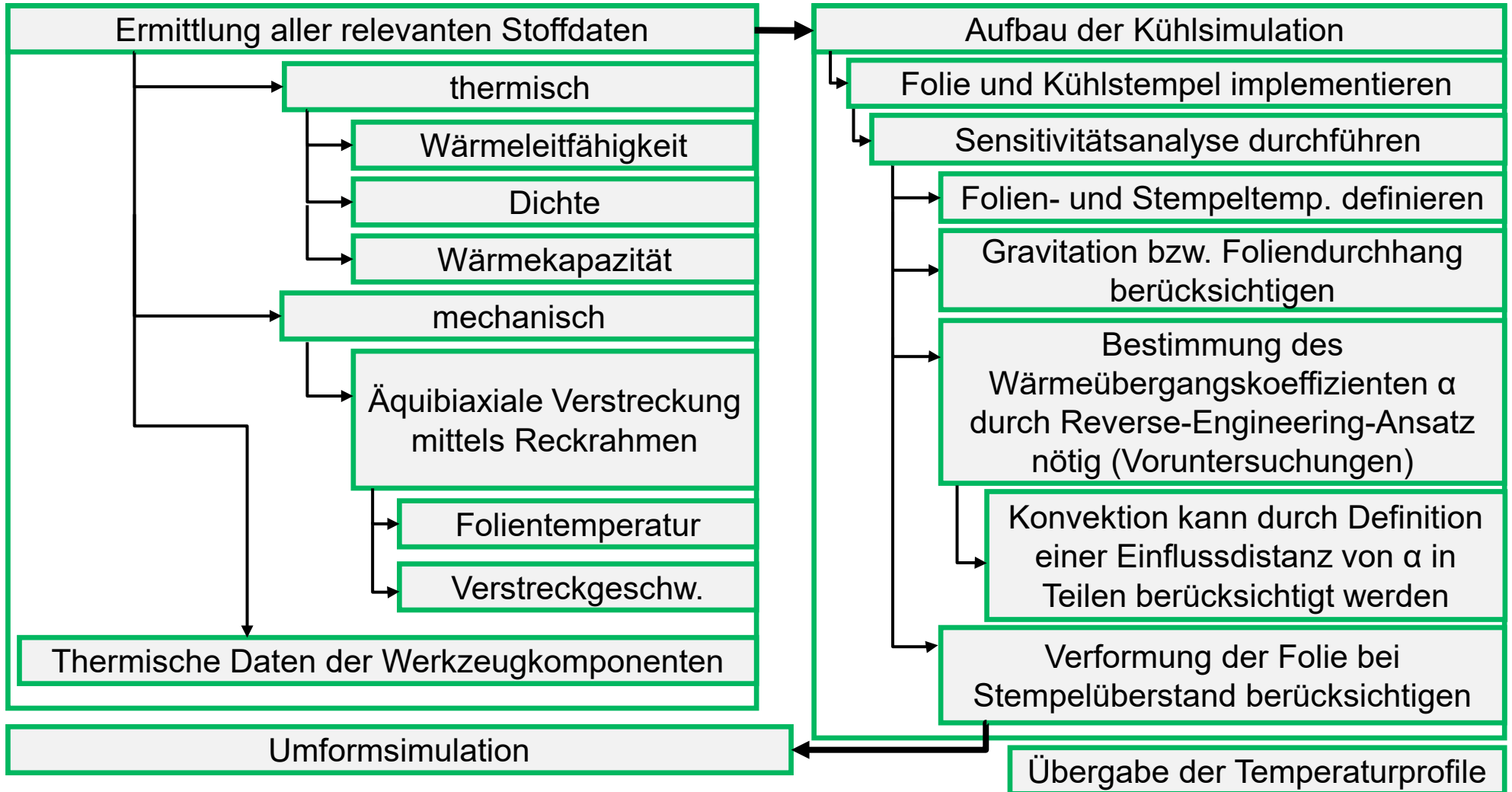
9 ENTWICKLUNG EINES LEITFADENS ZUR AUSLEGUNG DER AKTIVEN KÜHLUNG IM THERMOFORMEN

Insbesondere die Stempelgeometrien sowie Kontaktzeiten lassen sich nicht ohne Weiteres im Voraus bestimmen oder aus wenigen praktischen Versuchen ableiten. Daher wird empfohlen, eine thermische sowie eine anschließende Umformsimulationen zur Vorausberechnung der nötigen Kühlstempelgeometrien sowie Prozesseinstellungen zu nutzen. Anschließend sollte eine Geometrie- und Prozessparameterstudie durchgeführt werden. In Bild 9.1 und Bild 9.2 ist der Leitfaden zur Nutzung der Simulationen auf Basis der im Projekt gewonnenen Erfahrungen dargestellt. In Bild 9.3 ist weiterhin dargestellt, welche Parameter zu Beginn der Prozess- sowie Geometrieparametereinflussanalyse in welcher Schrittweite variiert werden sollten. Anschließend erfolgt eine Zusammenfassung der ermittelten Einflüsse auf die Wanddickenverteilung aus der Simulation und den durchgeführten Versuchen.

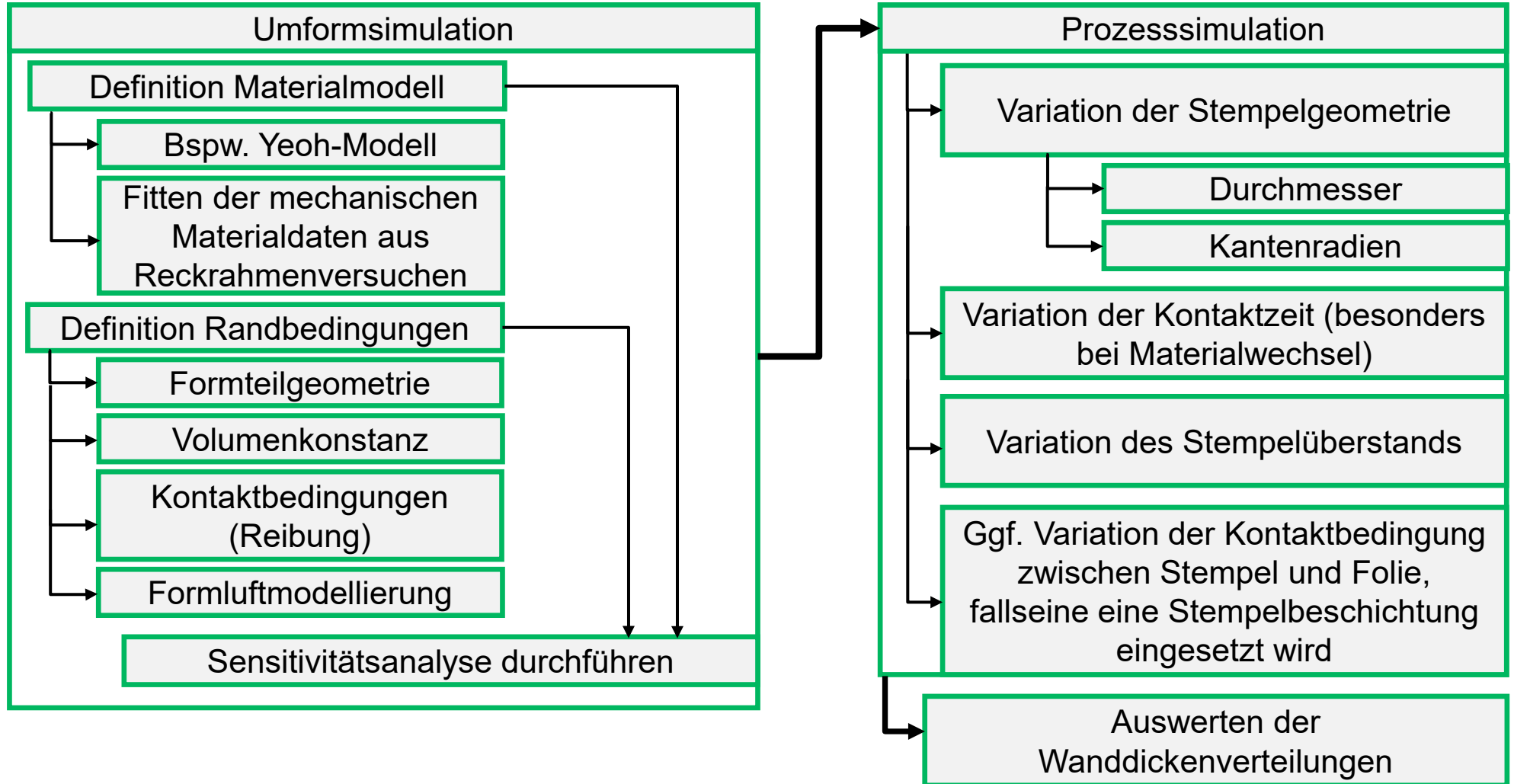
Der Leitfaden beschreibt die Vorgehensweise der Auslegung der lokalen aktiven Kühlung, bei der bereits die Erkenntnisse aus der Übertragung auf weitere Folienmaterialien sowie Geometrien mitberücksichtigt wurden. Zur Durchführung der Simulationen werden zu Beginn alle relevanten Stoffdaten der beteiligten Materialien ermittelt. Weiterhin muss neben der thermischen Datenermittlung insbesondere die Charakterisierung der eingesetzten Folie im Fokus stehen, da die temperaturabhängigen Verstreckeigenschaften von besonderer Bedeutung für die genaue Abbildung des Materialverhaltens während der Umformung sind. Wie bereits beschrieben, muss zwischen dem zeitlichen sowie finanziellen Aufwand zur Durchführung der Materialcharakterisierungen sowie der Genauigkeit des Materialmodells zur Beschreibung der Dehnviskosität ein Kompromiss gefunden werden. Die thermischen Stoffdaten zu den verwendeten Kühlstempeln sowie Kunststoffen können ebenfalls ermittelt werden. In dieser Arbeit wurden die Daten für diese aus der Literatur entnommen. Wie sich in den Simulationen gezeigt hat, weist die simulierte Wanddicke qualitativ zwar einen ähnlichen Verlauf zu den realen Wanddickenverteilungen auf, allerdings wird die Dicke in Formteilbereichen wie bspw. der Boden- und der Wandbereiche unter- bzw. überschätzt. Zur Erhöhung der quantitativen Simulationengenauigkeit sollte daher das dehnreologische Materialmodell feiner aufgelöst werden. So kann festgehalten werden, dass drei Folientemperaturen sowie drei Verstreckgeschwindigkeiten zur Abschätzung einer Wanddickenverteilung ausreichen. Für eine quantitativ genauer errechnete Wanddickenverteilung sind die Unterschiede durch die Interpolation zwischen den ermittelten Materialverhalten bei verschiedenen Prozessparameter jedoch zu groß.

Die thermischen Stoffdaten sowie die Daten für das jeweils gefittete Materialmodell der Dehnviskosität werden anschließend in die Kühl- sowie Umformsimulation implementiert.

Leitfaden zum Aufbau der Simulation der aktiven Kühlung im Thermoformen 1/2



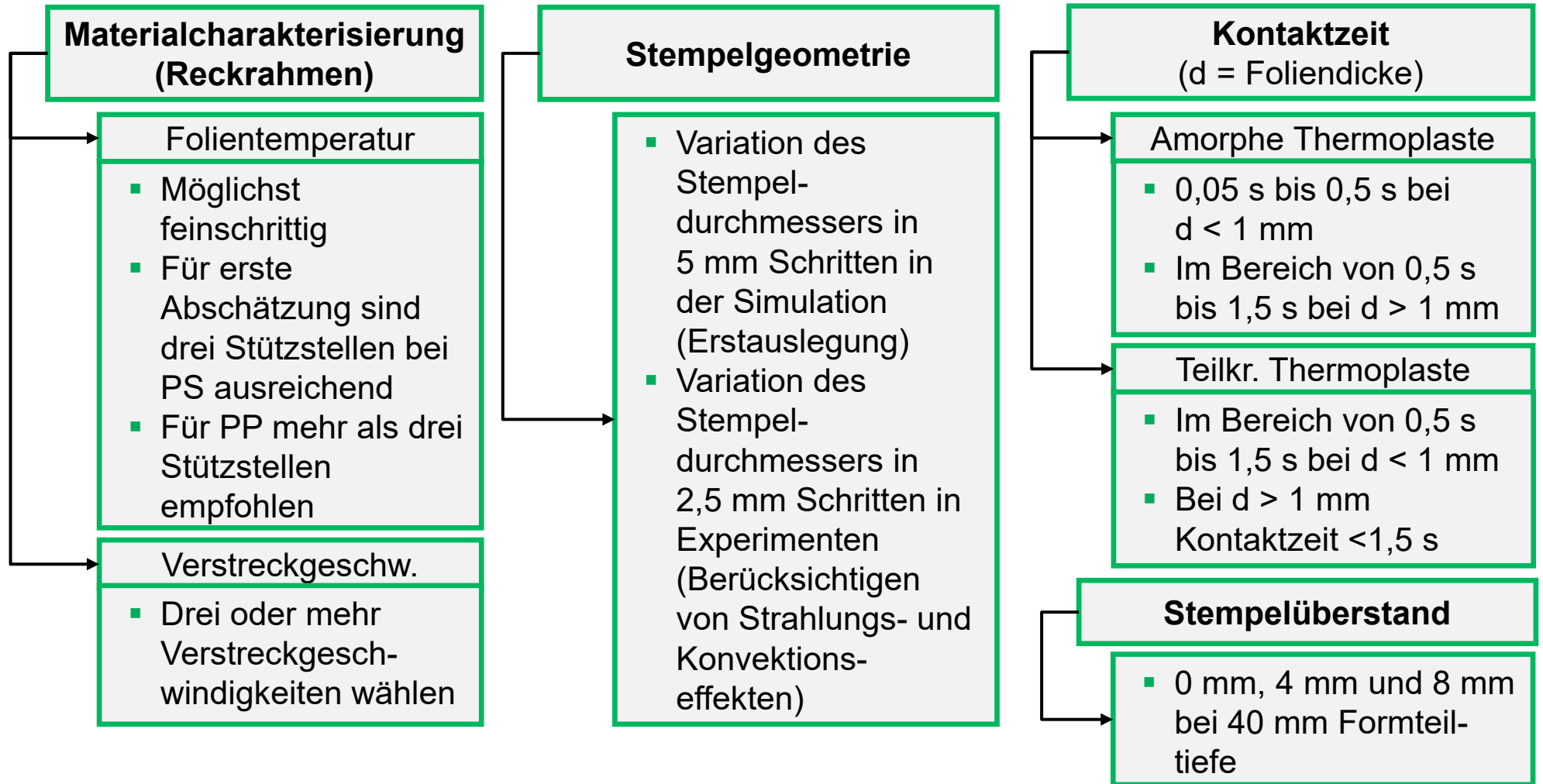
Leitfaden zum Aufbau der Simulation der aktiven Kühlung im Thermoformen 2/2



Der Aufbau der Kühl- und Umformsimulation erfolgt gemäß Kapitel 7. Eine Sensitivitätsanalyse ermöglicht die Bestimmung der nötigen Elementgrößen der Folie, um eine hinreichende Genauigkeit des Temperaturprofils bzw. der Waddickenverteilung bei möglichst geringer Rechenzeit zu erzielen. Bereiche mit großen Temperaturgradienten oder Verstreckgraden können bei Bedarf lokal feiner vernetzt werden. Weiterhin sollte zur Simulation der Temperaturprofilierung der Foliendurchhang durch die Gravitation berücksichtigt werden, da der Foliendurchhang die Kontaktbedingungen zwischen Folie und Stempel beeinflusst. Die Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten führte nur bei Verwendung des Reverse-Engineering-Ansatzes zu sinnvollen Ergebnissen. Aus der Literatur entnommene Werte unter- oder überschätzten die Wärmeübertragung und damit letztlich die Temperaturdifferenzen. So sind Voruntersuchungen zum Abgleich der simulierten sowie sich real ergebenden Temperaturprofile auf der Folie empfehlenswert. Der Einfluss der Konvektion sowie Strahlung kann in Ansätzen durch eine Einflussdistanz des Kühlstempels berücksichtigt werden. So wird der Wärmeübergangskoeffizient bspw. linear mit geringer werdendem Abstand zur Folie erhöht, bis bei Kontakt des Kühlstempels mit der Folie der ermittelte Wärmeübergangskoeffizient zu 100 % erreicht ist (vgl. Tabelle 7.1). Die so ermittelten Temperaturprofile müssen anschließend der Umformsimulation übergeben werden, in der die Ausformung der Folie mittels Formluft abgebildet wird. Die für die Umformsimulation benötigten Randbedingungen wie bspw. die Definition der Volumenkonstanz können dem Bild 9.1 entnommen werden. Auch in der Umformsimulation sollte zu Verbesserung der Simulationsgenauigkeit bei gleichzeitig möglichst geringer Rechenzeit eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt werden. Im Anschluss an den Aufbau der Umformsimulation kann die Prozesssimulation durchgeführt werden. Da insbesondere die Kühlstempelgeometrie sowie die Kontaktzeit einen großen Einfluss auf das Temperaturprofil bzw. die Waddickenverteilung aufweisen, sollte der Fokus zu Beginn auf die Variation dieser Parameter gelegt werden (Bild 9.3). In Bild 9.3 sind weiterhin die Schrittweiten der verschiedenen Variationen dargestellt, die sich bei den durchgeführten Simulationen als geeignet erwiesen haben. Anschließend können weitere Einstellungen des Kühlstempelüberstands sowie bspw. der Reibwerte zwischen Kühlstempel und Folie bei Verwendung von Beschichtungen des Kühlstempels simuliert und der Einfluss auf die Waddickenverteilung analysiert werden.

Aufgrund der stark unterschiedlichen Waddickenverteilungen bei verschiedenen Kühlstempelgeometrien sowie Prozesseinstellungen lassen sich nur Empfehlungen aufstellen, die den qualitativen Verlauf der Waddickenverteilung beschreiben. Der Empfehlungen wurden auf Basis des verwendeten PS-Materials der Hauptuntersuchungen erstellt und in Handlungsempfehlungen zusammengefasst.

Empfohlene Variationen der Prozessparameter sowie Schrittweiten bei Materialcharakterisierung sowie Simulation



Aus den praktischen Untersuchungen sowie den Simulationen ergeben sich bei der Verwendung von 0,8 mm und 1,2 mm dicken Polystyrol-Folien die folgenden Zusammenhänge, die wie folgt zusammengefasst werden können:

Kühlstempelgeometrie, -material und Beschichtung

- Wenn der **Kühlstempelradius** verkleinert wird, wird die Kühlung in den Bereich der Folie verlagert, die nach der Umformung im Bereich des Formteilbodens resultiert. Der Formteilboden wird mit kleinerem Stempeldurchmesser somit dicker.
- Wenn am **Kühlstempel Kantenradien** vorgesehen werden, wird der gekühlte Bereich ebenfalls in die Folienmitte und nach der Umformung in den Formteilboden verschoben. Der Formteilboden wird dicker ausgeführt. **Schreckmarken** können leicht verringert werden.
- Die Änderung des **Kühlstempelmaterials** weist aufgrund der veränderten Wärmeleitfähigkeit ebenfalls einen Einfluss auf die Wanddickenverteilung auf. Der Einfluss muss jedoch weiter analysiert werden, da die Ergebnisse widersprüchlich sind. Eine klare Aussage ist daher nicht möglich.
- Die **Beschichtung von Kühlstempel** mit bspw. PTFE zur Reduktion der Reibung zwischen Kühlstempel und Folie weist einen Einfluss auf die Wanddickenverteilung auf, wenn ein ausreichend großer Stempelüberstand eingestellt wird. Erst bei einem großen Überstand wird die Verstreckung der Folie bereits beim Zufahren des Werkzeugs so beeinflusst, dass je nach Stempelbeschichtung der Kunststoff unterschiedlich stark vom Stempel abgezogen wird. Bei einer Beschichtung wird der Bodenbereich leicht dünner. Eine grundlegende Änderung der Wanddickenverteilung kann nicht erzeugt werden.

Prozessführung

- Die **Stempeltemperatur** weist einen Einfluss auf die Ausprägung der Temperaturprofile und damit auf die Wanddickenverteilungen auf. Je niedriger die Stempeltemperatur gewählt wird, desto stärker wird die Folie gekühlt. Eine stärkere Kühlung führt zu niedrigeren Folientemperaturen, die zu höheren Verstreckwiderständen führen, sodass das die Wanddicke in den gekühlten Bereichen dicker bleibt. Zu niedrige Stempeltemperaturen können zu Kondensation von Wasser oder Eisbildung am Stempel führen. Das Wasser verbleibt auf den Formteilen und führt zu wenig reproduzierbaren Temperaturprofilen, sodass Stempeltemperaturen von unter ca. 10 °C nicht empfohlen werden. Im projektbegleitenden Ausschuss wurde dazu angemerkt, dass bei Formung von technischen Produkten bei ausreichend geringer Zykluszeit das Kondensieren von Wasser oder die Eisbildung am Stempel

durch den Eintrag der Wärme aus der Folie in den Stempel vermieden werden konnten. Dieser Effekt konnte bei der Durchführung der Experimente mit der verwendeten Thermoformanlage nicht beobachtet werden. Die Stempeltemperatur muss entsprechend in Abhängigkeit der Zykluszeit und dem jeweilig vorhandenen Wärmeeintrag bewertet werden.

- Durch die Veränderung der **Folientemperatur** kann die Wanddickenverteilung ebenfalls beeinflusst werden. Eine höhere Folientemperatur führt zu einem geringeren Einfluss der Kühlstempel, da bei höheren Temperaturen die Temperaturabhängigkeit der Verstrekwiderstände geringer ist. So wird bei höheren Folientemperaturen der Einfluss der Kühlung minimiert. Bei niedrigeren Folientemperaturen kehrt sich dieser Effekt um, da der Änderung der Verstrekwiderstände bei Temperaturdifferenzen in niedrigeren Temperaturbereichen größer ist.
- Eine direkte Umformung der Folie nach dem Schließen des Werkzeugs ist aufgrund der vergleichsweise trägen Wärmeleitung nicht zielführend, da nicht ausreichend Zeit zur Ausprägung eines Temperaturprofils besteht, dass die Verstreckung und damit Wanddickenverteilung hinreichend beeinflusst. Daher wird empfohlen eine **Verzögerungszeit** bis zum Zuschalten der Formluft einzustellen, die die Kontaktzeit zwischen Kühlstempel und Folie erhöht. Ausgeprägtere Temperaturprofile sind das Resultat, die eine Anpassung der Wanddickenverteilung ermöglichen.
- Durch die Erhöhung des **Stempelüberstands** kann die Länge der Kontaktzeit bzw. die Kühlung durch ein früheres und stärkeres Anlegen der Folie an den Kühlstempel ebenfalls erhöht werden. Wird zusätzlich die Kontaktzeit durch die Erhöhung der **Verzögerungszeit** verlängert, sinkt die Temperatur der Kontaktbereiche besonders stark ab. Hohe Verstrekwiderstände sind das Resultat, die zu dicken Formteilbereichen führen.
- Eine Änderung der **Foliendicke** macht die Anpassung der Kontaktzeit bzw. der Kühlstempeltemperatur unabdingbar. Beim Einsatz von beispielsweise dickeren Folien muss die Kontaktzeit bis zur Umformung mittels Formluft stark erhöht werden, um einen ausreichenden Einfluss auf die Verstrekwiderstände erzielen zu können. Durch die nötige Verlängerung der Kontaktzeit zwischen Kühlstempel und Folie wird die Effizienz aufgrund einer insgesamt verlängerten Zykluszeit insbesondere bei Verpackungsanwendungen gesenkt.
- Bei **Änderung des eingesetzten Kunststoffes** bedarf es ebenfalls wie bei der Änderung der Foliendicke eine Anpassung der Kontaktzeiten, da die veränderten Stoffdaten zu anderen Temperaturprofilausprägungen führen. Weiterhin variiert der Einfluss der Temperaturunterschiede auf die sich ausbildende Wanddickenverteilung,

da verschiedene Kunststoffe unterschiedlich stark ausgeprägte temperaturabhängige Materialverhalten aufweisen.

Im Anschluss an die Erstellung des Leitfadens auf Basis der Versuche mit PS-Folien wurden weitere Untersuchungen bei Verwendung anderer Folienmaterialien sowie eine Übertragung auf andere Werkzeugkavitäten durchgeführt. Die Erkenntnisse sind bereits zur verbesserten Übersichtlichkeit mit im Leitfaden bzw. den Empfehlungen ergänzt. Ausgewählte Ergebnisse zu den weiteren Untersuchungen werden im Folgenden dargestellt.

9.1 Übertragung der Ergebnisse auf weitere Folienmaterialien, Werkzeuggeometrien sowie Kühlstempel am Beispiel eines Schalenbauteils

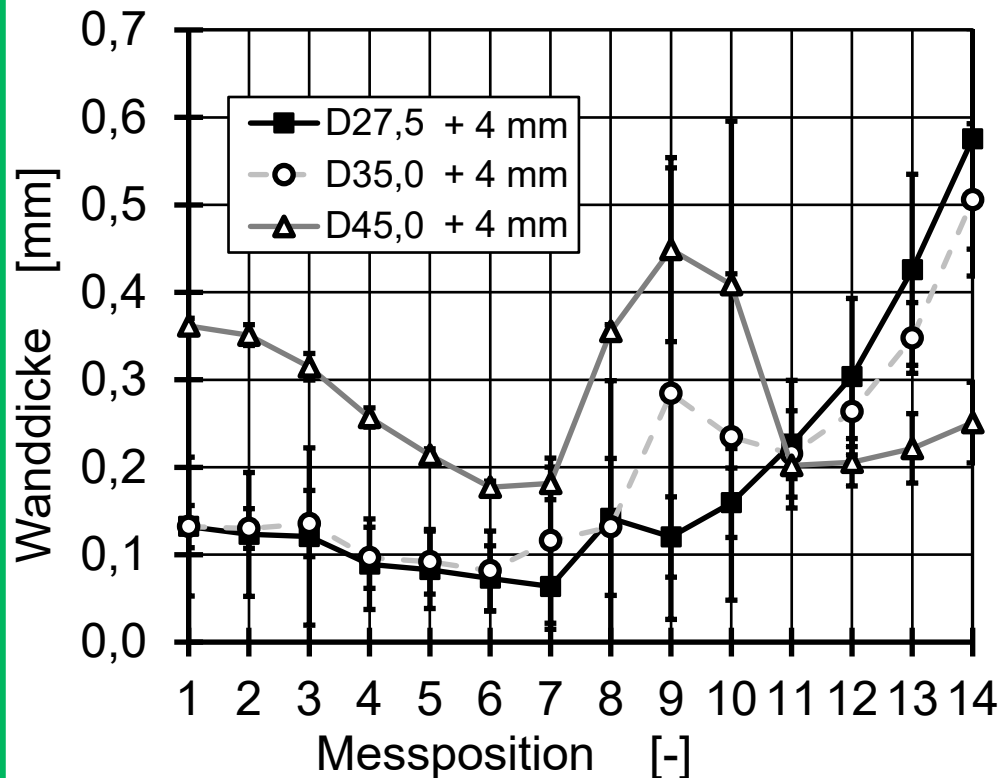
9.1.1 Wanddickenverteilungen bei Verwendung von PP und aPET

Die Wanddickenverläufe beim Einsatz von PP- sowie aPET-Folien sind in Bild 9.4 dargestellt. Wie an den jeweilig gewählten Kühlstempeldurchmessern sowie Kontaktzeiten zu erkennen, müssen die Prozesseinstellungen sowie die Kühlstempelgeometrien bei der Wahl eines anderen Folienmaterials grundlegend verändert werden. Während bei PS Kontaktzeiten von 0,2 s und weniger zu einer ausreichenden Beeinflussung der Verstreckwiderständen ausreichen, mussten die Kontaktzeiten bei PP und aPET stark verlängert werden, um Einflüsse zu erzielen. Bei aPET konnte sowohl durch Variation der Kühlstempeldurchmesser und der Kontaktzeiten keine grundlegend verschiedenen Wanddickenverteilungen erzeugt werden. Wieso dies nicht möglich war, ließ sich auch in Absprache mit dem projektbegleitenden Ausschuss nicht endgültig klären. Lediglich die längeren Kontaktzeiten bei beiden Materialien können durch die verschiedenen, im Vergleich zu PS (1,3 J/kgK), höheren Wärmekapazitäten erklärt werden, da mehr Wärme aus der Folie abgeführt werden muss, um die lokalen Temperaturen abzusenken (PP: 1,7 J/kgK; aPET: 1,5 J/kgK). Da sich die Verstreckwiderstände der verschiedenen Kunststoffe ebenfalls unterschiedlich verhalten und andere unterschiedlich starke Temperaturabhängigkeiten aufweisen, müssen weiterhin die Kühlstempeldurchmesser variiert werden, um die Verstreckung zu beeinflussen. Während bei PS Stempeldurchmesser von 30 mm bis 35 mm zu einer Vergleichmäßigung der Wanddickenverteilung führten, war bei PP ein Durchmesser von 45 mm notwendig. Besonders auffällig bei PP sind besonders die entstanden sehr dicken Schreckmarken sowie insgesamt die großen Standardabweichungen. Diese lassen sich auf eine ungleichmäßige Kühlung zurückführen, die wiederum durch ein Wellen der PP-Folien nach dem Aufheizprozess begründet werden kann. Die Wellung der Folie führt dazu, dass bei jeder Formung der Kühlprozess durch unterschiedliche Kontaktbedingungen beeinflusst ist. So treten verschiedene Folienbereiche zu unterschiedlichen Zeitpunkten mit dem Kühlstempel in Kontakt, sodass lokal andere Abkühlbedingungen und anschließend Verstreckbedingungen

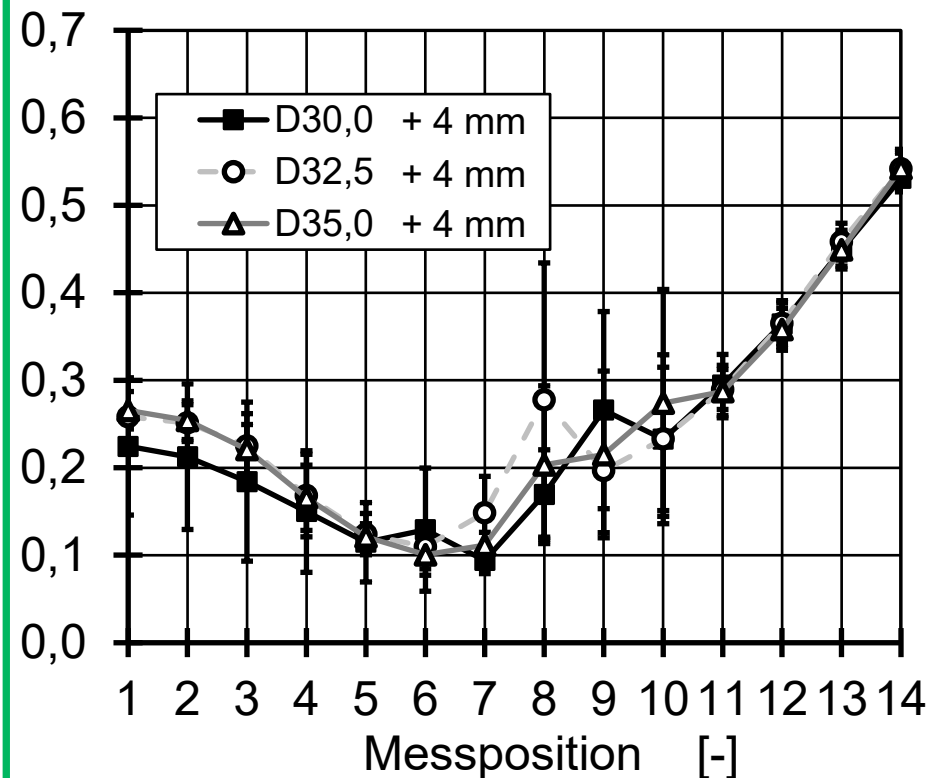
Resultierende Wanddickenverteilungen beim Einsatz von PP und aPET

Stempeltemperatur: 20 °C; Folientemperatur: 130 °C (PP), 100 °C (aPET)
Becherdurchmesser: 60 mm, Tiefe: 40 mm

Material: PP; Kontaktzeit: 3 s



Material: aPET; Kontaktzeit: 1 s



vorliegen. Eine reproduzierbare Prozessführung mit PP bzw. Materialien, die zur Wellenbildung nach dem Aufheizen führen, ist somit als eine große Herausforderung bei der Verarbeitung im Thermoformprozess mit aktiver Kühlung anzusehen.

Die Simulationen der Wanddickenverteilungen beim Einsatz von PP führten nicht zu den erwarteten Ergebnissen wie bei Verwendung von PS. Es zeigt sich, dass selbst bei einer Änderung der Kontaktzeit von 0,2 auf 2 s sowie einem Stempelüberstand von 4 mm keine maßgeblichen Änderungen in den Wanddickenverteilungen erzeugt werden konnten. In Bild 9.5 sind ausgewählte Wanddickenverteilungen bei verschiedenen Kontaktzeiten aus der Simulation mit PP-Folie dargestellt. Deutlich zu erkennen ist, dass die zuvor für PS bestimmten Kontaktzeiten nicht zur Anpassung der Wanddickenverteilungen geeignet sind. Lediglich eine Kontaktzeit von 0,2 s beeinflusst die Wanddickenverteilung im Bereich der MP 9 bis MP 12 minimal. Auch eine verlängerte Kontaktzeit von 1 s bzw. 2 s wies in der Simulation keinen Einfluss auf die Wanddickenverteilung der Formteile auf, obwohl die erzeugten Temperaturdifferenzen auf der Folie in der Simulation bis zu 15 °C betragen. Eine weitere Simulation zeigte, dass bei Änderung der Folientemperatur von 130 °C auf 140 °C bereits eine Kontaktzeit von 0,2 s ausreichend ist, um einen Einfluss zu erzeugen, der jedoch in der Realität nicht beobachtet werden konnte, da die Kontaktzeit zur Erzeugung dieser Wanddickenverteilung bei einer niedrigeren Folientemperatur von 130 °C 2 s beträgt. Diese Diskrepanzen zeigen, dass zum einen die verschiedenen Folientemperaturen die Dehnviskosität bestimmen und einen signifikanten Einfluss auf die Genauigkeit der Simulationsergebnisse aufweisen - die Dehnviskosität sollte daher mit mehr Stützstellen feiner aufgelöst werden. Zum anderen muss eine erneute Anpassung des Wärmeübergangskoeffizienten erfolgen, da sich aufgrund der erhöhten Wärmekapazität von PP ein andersartiger Wärmetransport von der Folie in den Kühlstempel ergeben.

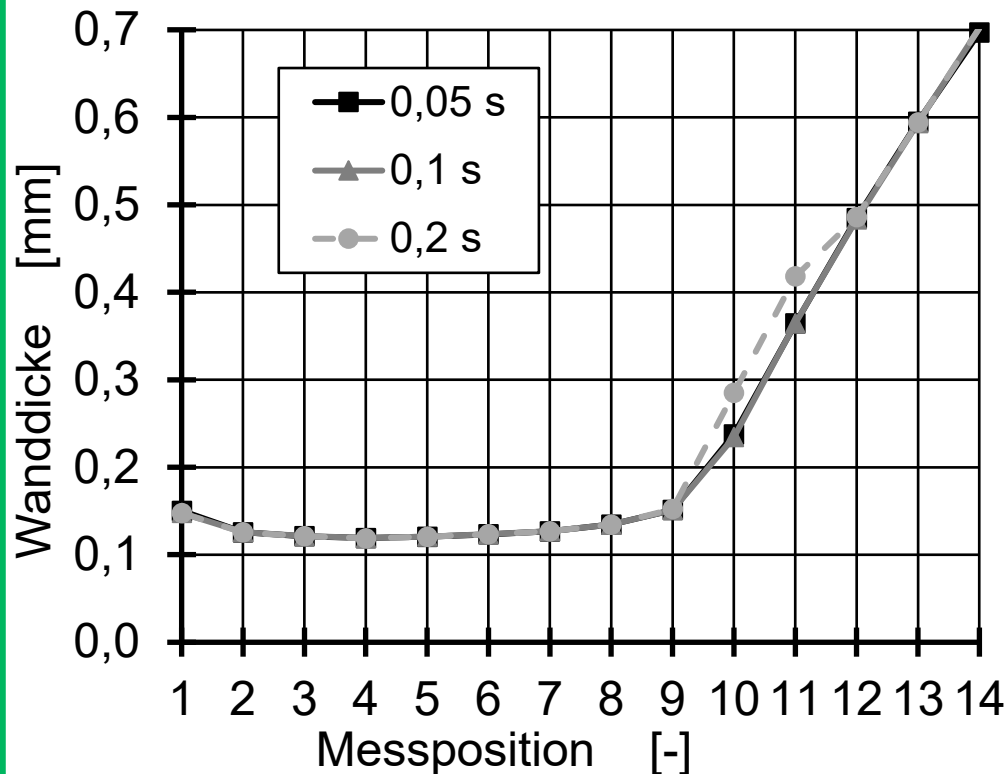
9.1.2 Wanddickenverteilung bei veränderter Werkzeuggeometrie

Neben der Übertragung auf andere Folienmaterialien wurde geprüft, ob die Formung von weiteren Formteilgeometrien möglich ist und die Wanddickenverteilung auch für diese Formteile verbessert werden kann. Als weiteres Formteil wurde ein Becher gewählt, der einen Öffnungsdurchmesser von 80 mm, eine Tiefe von 40 mm sowie eine Entformungsschräge von 4° aufweist. Die resultierenden Wanddickenverteilungen werden exemplarisch für die Stempeldurchmesser von 40 mm sowie 45 mm in Bild 9.6. dargestellt. Wie zu erwarten war, mussten die Stempeldurchmesser vergrößert werden, da auch der Becherdurchmesser mit 80 mm größer ist als zuvor. Dabei wird erneut deutlich, dass insbesondere der Stempeldurchmesser einen großen Einfluss auf das Ausformresultat aufweist. Kleinere Stempeldurchmesser als 40 mm würden nur zu einer Kühlung der Bodenbereiche des

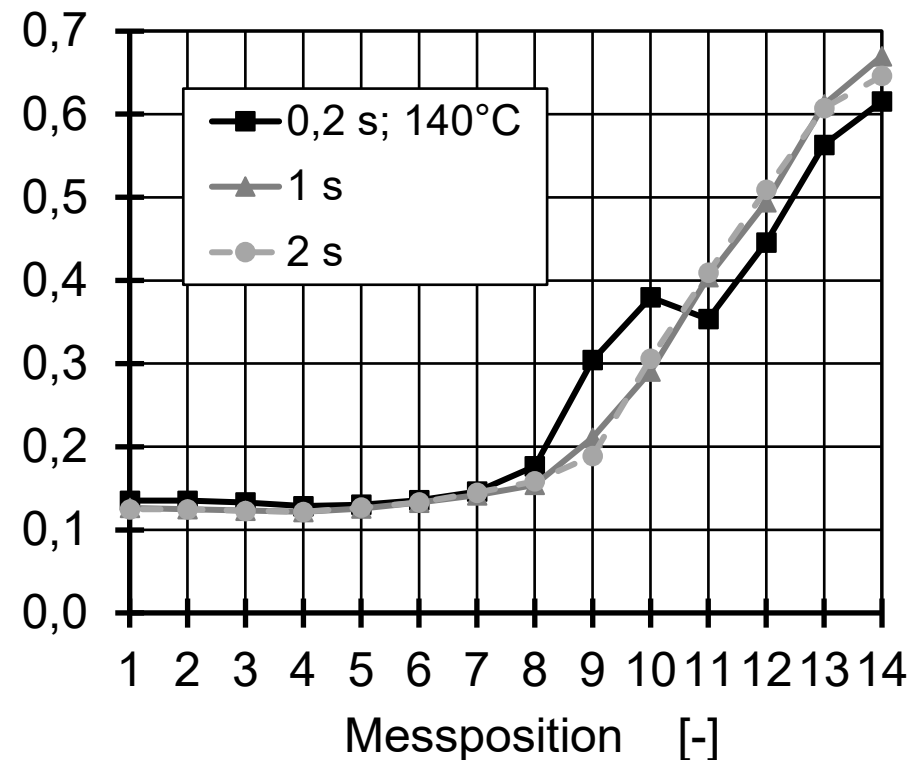
Simulierte Wanddickenverteilungen bei Verwendung von PP

Stempeltemperatur: 20 °C; Folientemperatur: 130 °C (PP)
Stempeldurchmesser: 35 mm; Stempelüberstand: 4 mm

Zuvor bestimmte Kühlzeiten



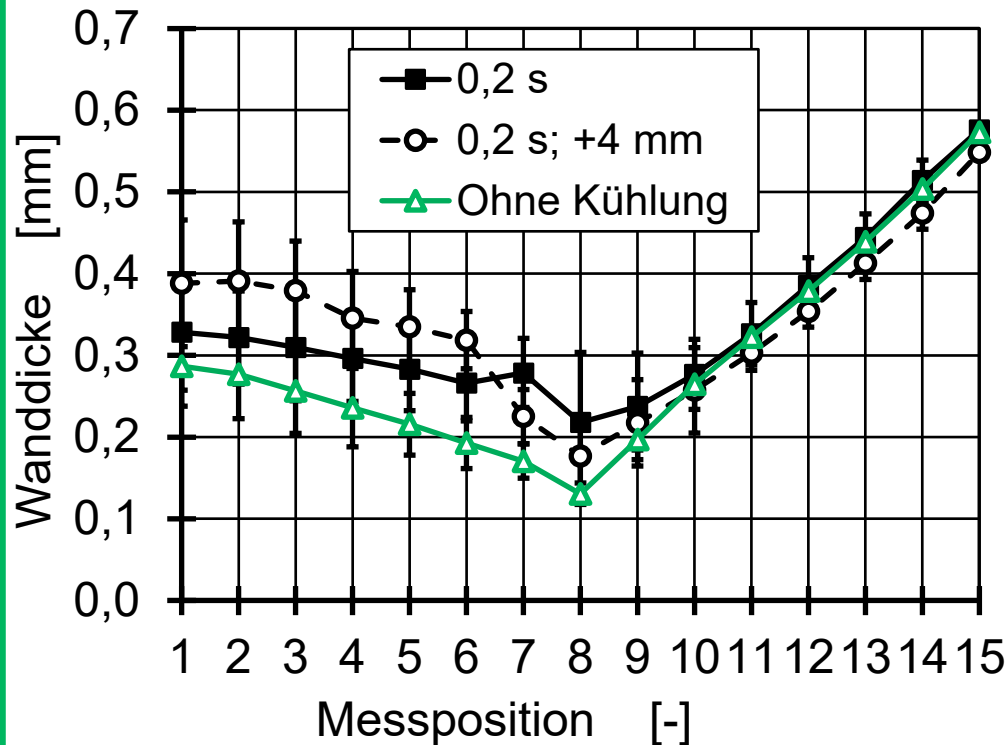
Angepasste Kühlzeiten



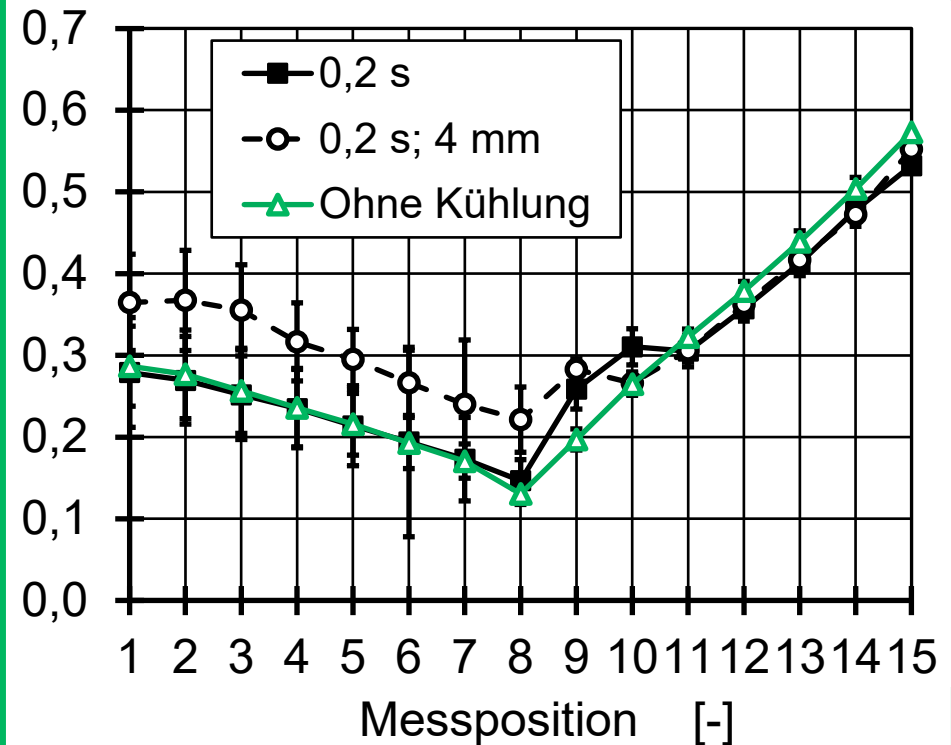
Wanddickenverteilung bei Verwendung einer anderen Formteilgeometrie

Stempeltemperatur: 20 °C; Folientemperatur: 120 °C (PS)
 Becherdurchmesser: 80 mm, Tiefe: 40 mm

Stempeldurchmesser: 40 mm



Stempeldurchmesser: 45 mm



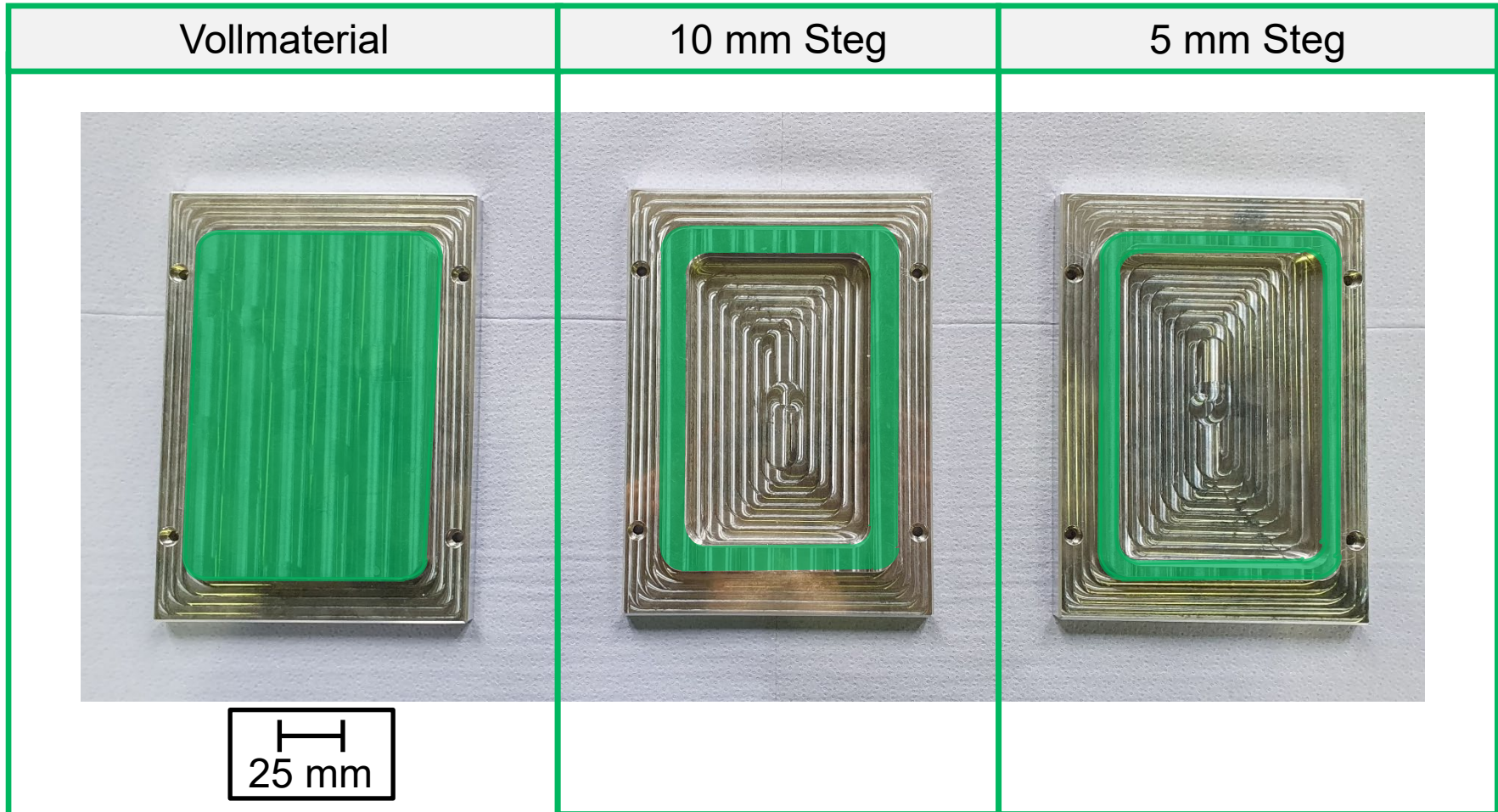
Formteils führen. Durch die Wahl verschiedener Kühlstempelgeometrien kann gezeigt werden, dass die Wanddickenverteilung bzw. die Dünnstelle der Formteile auch bei einer anderen Formteilgeometrie angepasst werden kann. Bei einem Kühlstempeldurchmesser von 40 mm wird der Bodenbereich gegenüber einer reinen Formluftausformung um ca. 0,11 mm dicker ausgeführt (MP 1). Um die verminderte Verstreckung im Übergangsbereich zwischen Boden und Wand des Formteils zu erzielen, muss eine Kontaktzeit von 0,2 s sowie ein Stempelüberstand von 4 mm verwendet werden. Eine Beeinflussung der Wanddickenverteilung ist auch ohne zusätzlichen Stempelüberstand möglich, führt jedoch zu einer nur geringfügig dickeren Wanddicke im Bodenbereich von ca. 0,06 mm (MP 1), da die aus der Folie abgeführt Wärmemenge geringer ist gegenüber einem Stempelüberstand von 4 mm. Wird der Stempeldurchmesser auf 45 mm erhöht, wird der Einfluss des Kühlstempels auf den Bodenbereich leicht reduziert, da andere Folienbereiche gekühlt werden. Die gekühlten Folienbereiche liegen am Ende der Umformung eher im Wandbereich des Formteils, sodass der Einfluss auf den Bodenbereich geringer ausfällt. So wird die Wanddicke um maximal 0,07 mm dicker (MP 1). Für alle Formteile gilt erneut, dass ein dickerer Bodenbereich tendenziell zu einem dünneren Formteilwandbereich führt, da Volumenkonstanz gilt. Die Unterschiede zwischen den verschiedenen Wanddickenverteilungen sind jedoch prinzipiell geringer gegenüber einem kleineren Formteil, was darauf zurückzuführen ist, dass das Material auf eine größere Fläche verteilt wird, sodass die Wanddickendifferenzen zwischen den verschiedenen Prozesseinstellungen geringer werden. Durch die Übertragung der Erkenntnisse auf eine weitere Formteilgeometrie konnte gezeigt werden, dass einer Anpassung der Formteilgeometrie auch eine Anpassung der Kühlstempelgeometrie folgen muss. Grund dafür ist, dass die Änderung der Prozesseinstellungen nur eine Änderung der lokalen Ausprägung der Wanddicke zur Folge hat und die Wanddickenverteilung qualitativ ähnlich im gesamten Verlauf bleibt.

9.1.3 Übertragung der Ergebnisse auf ein Schalenbauteil sowie resultierende Wanddickenverteilung

Da rotationssymmetrische Formteile vergleichsweise einfache Verstreckbedingungen aufweisen, weil alle Verstreckungen der Folie rotationssymmetrisch sind, wurde geprüft, ob eine Anpassung der Wanddickenverteilungen auch bei Schalenformteilen möglich ist. Zur Auslegung der Kühlstempelgeometrie bei Schalenformteilen wurde die Strategie gewählt, sich an Vorstreckstempelgeometrien zu orientieren, die zu einer homogenisierten Wanddickenverteilung führen [Hop19]. Es wurden diejenigen Folienbereiche gekühlt, die mit dem Vorstreckstempel zuerst in Kontakt kommen. Die Kühlstempel wurden mit und ohne Kühlsteg ausgeführt, wie in Bild 9.7 dargestellt ist. Die drei Kühlgeometrien weisen Abmaße von 142 mm x 96 mm mit einem Radius von 9 mm auf. In Bild 9.8 sind die dazugehörigen

Temperaturprofile dargestellt. Eine Kontaktzeit von 0,2 s führt wie auch beim der Temperaturprofilierung der Folien für die Becherformteile zu Temperaturunterschieden von bis zu ca. 12 °C. Bereits in den Thermografieaufnahmen ist die Herausforderung einer symmetrischen Temperaturprofilierung zu erkennen. Trotz einer zueinander parallel ausgerichteten Werkzeugtechnik bezüglich der Kühlstempel- und Formteilseiten wurden die Temperaturprofile je nach Foliendurchhang nicht spiegelsymmetrisch auf die Folie übertragen. Dies kann auf den Foliendurchhang zurückgeführt werden, der zu lokal unterschiedlichen Temperaturänderungen führen kann. Die Problematik des Foliendurchhangs wird des Weiteren in Bild 9.9 deutlich, in dem die resultierenden Wanddickenverteilungen der Schalenformteile dargestellt sind. Die verschiedenen Wanddickenverteilungen unterscheiden sich kaum. Lediglich in MP 22 ist ein Einfluss auf die Wanddickenverteilung bei einer Kontaktzeit von 0,2 s zu erkennen. Die Wanddicke im Boden des Schalenformteils wird kaum beeinflusst. So konnte gezeigt werden, dass die Wanddickenverteilung durch die in Anlehnung an die klassischen Vorstreckstempel konstruierten Kühlstempel nicht optimal beeinflusst werden kann. Die Kühlung der Folie muss weiter in Richtung Folienmitte verschoben werden. Zusätzlich ergab sich bei der Formung ein größerer Durchhang der Folie, der einen ausgeprägteren Einfluss auf die lokale Kühlung durch die Kühlstempel aufweist, da die Formfläche der Schale gegenüber den Becherformteile größer ist. Dies führte dazu, dass die Temperierung in der Mitte der Folie anspruchsvoller umzusetzen ist, da der Abstand zwischen den flachen Kühlstempeln und der Folie mit zunehmendem Durchhang größer wird. Der Foliendurchhang konnte nicht über den Stempelüberstand kompensiert werden, der mit bereits 6 mm gegenüber dem bei den Becherformteilen gewählten 4 mm vergleichsweise groß war. So konnten durch die Formung der Schale zwei wesentliche Dinge ermittelt werden: Zum einen kann sich nicht bei der Auslegung der Kühlstempel/der Kontaktflächen der Kühlstempel an den Kontaktflächen der Vorstreckstempel orientiert werden, da dort durch die Haftung der Folie am Stempel grundlegend andere Verstreckbedingungen gegenüber der Temperaturprofilierung erzeugt werden. Zum anderen ist bei Formteilen mit großen Formflächen der Foliendurchhang bei der Auslegung und Konstruktion der Kühlstempelgeometrie zu berücksichtigen. Ansonsten ist das gleichmäßige Kühlen der Folie kaum möglich. Dennoch ist auch in dem Fall die Reproduzierbarkeit fraglich, da es unwahrscheinlich ist, dass in jedem Formzyklus der gleiche Foliendurchhang erzeugt wird. So ist es möglich, dass die Geometrie des Kühlstempels den Foliendurchhang entweder zu geringfügig und zu stark darstellt, was zu veränderten Temperaturprofilen durch veränderte Kühlbedingungen führt. Soll die aktive Kühlung bei großflächigen Formteilen eingesetzt werden, so sind weitere Forschung bzw. weitere Anpassung der Kühlstempelgeometrie sowie Prozessführung notwendig. Weiter empfiehlt sich der Einsatz von Simulationen, die den

Einsatz der aktiven Kühlung bei Formung eines Schalenformteils



Thermografieaufnahmen der gekühlten Folien bei Formung eines Schalenformteils

Stempeltemperatur: 20 °C; Folientemperatur: 120 °C (PS)
Stempelüberstand: 6 mm; Messmethode: Infrarotkamera

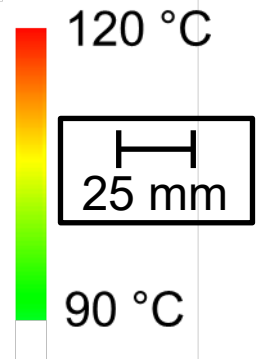
Verzögerungszeit: 0 s



Verzögerungszeit: 0,1 s



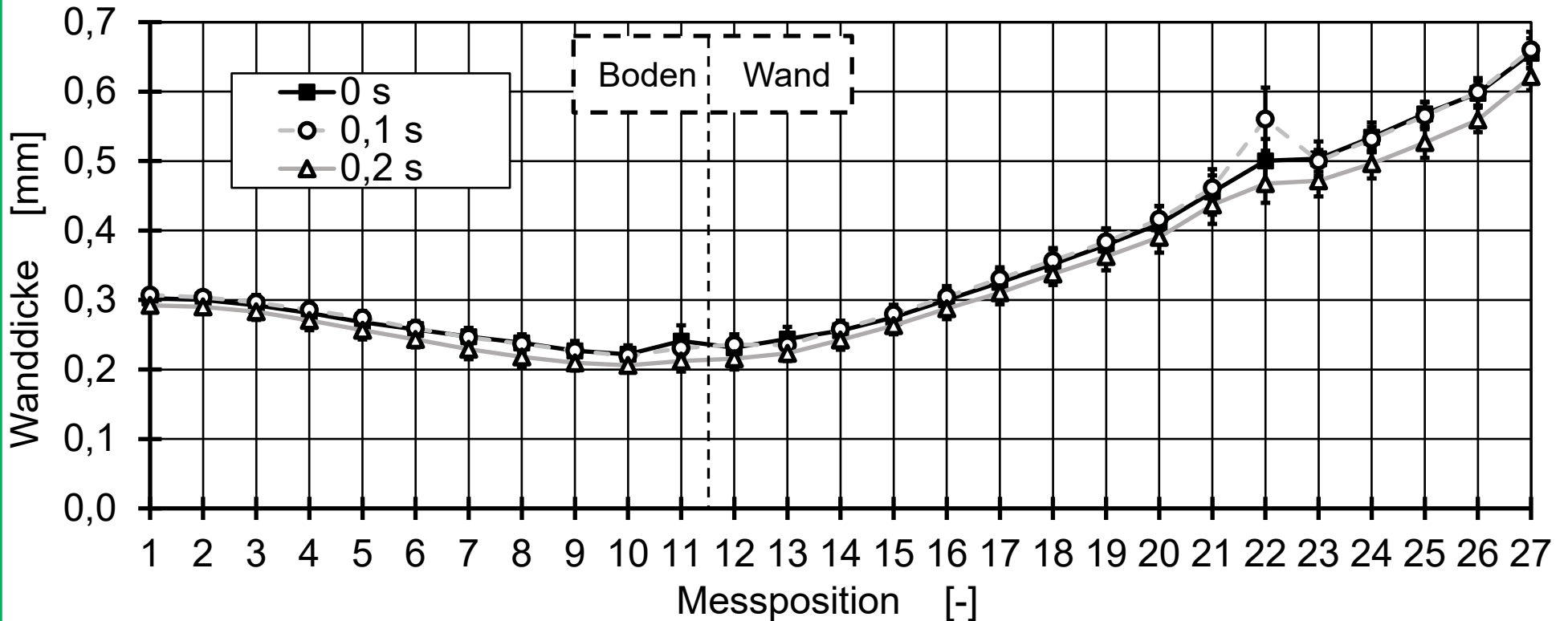
Verzögerungszeit: 0,2 s



Resultierende Wanddickenverteilung der Schalenformteile

Stempeltemperatur: 20 °C; Folientemperatur: 120 °C;
Kontaktzeit: 0,2 s; Stempelüberstand: 6 mm; Material: Polystyrol

Kühlstempel mit Stegbreite 5 mm



Durchhang der Folien noch genauer abbilden können, wodurch die Kühlstempelgeometrieauslegung vereinfacht werden kann.

10 FAZIT UND AUSBLICK

In diesem Forschungsvorhaben wurde der Einsatz der aktiven Kühlung im Thermoformen zur Anpassung der Wanddickenverteilung rotationssymmetrischen Becherformteilen erprobt. Die Temperaturprofilierung der Folie durch eine aktive Kühlung zielt darauf ab, die Verstrekwiderstände der Folie so zu beeinflussen, dass die Wanddickenverteilung der Formteile gleichmäßig wird. Die den klassischen Vorstreckstempel ersetzenden Kühlstempel wurden mittels CO₂ gekühlt. So konnten Stempeltemperaturen von bis zu -10°C erzeugt werden, die jedoch aufgrund von kondensierendem bzw. gefrierendem Wasser im Forschungsumfeld nicht als sinnvoll zu erachten sind. Daher wurde für die Hauptuntersuchungen eine Kühlstempeltemperatur von 20 °C gewählt. Die Kühlstempel entziehen der Folie lokal Wärme, sodass gekühlte Bereiche der Folie weniger verstreckt werden als Bereiche, die eine höhere Folientemperatur beim Umformvorgang aufweisen. Da die Temperatursgleichungsvorgänge in der Folie langsamer ablaufen als die Umformung der Folie, müssen Verzögerungszeiten bzw. Kontaktzeiten bis zum Einsetzen der Formluft vorgesehen werden. Die Kontaktzeiten ermöglichen es, die Folie über der gesamten Foliendicke zu kühlen. Problematisch ist jedoch insbesondere im Bereich der Verpackungsanwendungen, dass durch die Verzögerungszeit die Zykluszeit verlängert wird.

Wie die numerischen Simulationen sowie die praktischen Untersuchungen gezeigt haben, ist eine Anpassung der Wanddickenverteilung durch den Einsatz der lokalen Kühlung möglich. Besonders großen Einfluss auf die Ausprägung der resultierenden Wanddickenverteilung weisen die Kühlstempelgeometrie sowie die Kontaktzeit zwischen Folie und Kühlstempel auf. Durch die Änderung des Kühlstempeldurchmessers können unterschiedliche Formteilbereiche in ihrer Dicke angepasst werden. Bei der Durchführung der Versuche konnte bei einem Becherformteil mit 60 mm Durchmesser, einer Tiefe von 40 mm sowie einer Entformungsschräge von 4° die Wanddickenverteilung mit einem Kühlstempeldurchmesser von 30 mm von einer maximalen Wanddickendifferenz von ca. 0,49 mm auf ca. 0,29 mm gleichmäßig werden. In Abhängigkeit der weiteren Prozesseinstellungen wie Kontaktzeiten oder einem Stempelüberstand, der die Kontaktzeit weiter erhöht, kann die Wanddickenverteilung weiter in ihrer lokalen Ausprägung angepasst werden. Eine globale Änderung der Wanddickenverteilung kann jedoch hauptsächlich über die Änderung des Kühlstempeldurchmessers erzeugt werden. Eine Übertragung der Erkenntnisse auf weitere Geometrien ist möglich. Allerdings muss bei großen Formteilen mit großen Formflächen der Foliendurchhang berücksichtigt werden, da dieser einen großen Einfluss auf die Kontaktbedingungen zwischen Folie und Stempel aufweist.

Um die Auslegung der Stempelgeometrie sowie die Wahl der Prozesseinstellungen auf für komplexere Formteilgeometrien zu verkürzen, wurde eine Simulationsroutine aufgebaut, die sowohl die Temperaturprofilierung der Folie als auch anschließend die resultierende Wanddickenverteilung der Formteile nach der Umformung mit Formluft berechnet. Die Temperaturprofile konnten mittels der Bestimmung eines Wärmeübergangskoeffizienten über einen Reverse-Engineering-Ansatz bestimmt werden. Aus der Literatur entnommene Werte führten nicht zu den real gemessenen Temperaturprofilen bzw. -gradienten. Zur vereinfachten Bestimmung von Wärmeübergangskoeffizienten existiert somit weiterer Forschungsbedarf. Die Simulationen zeigten, dass die Wanddickenverteilungen physikalisch sinnvoll abgebildet werden und in guter Näherung den realen Wanddickenverteilungen entsprechen. Lediglich die lokale Dicke wird je nach Formteilbereich unter- oder überschätzt. Dies kann auf die Beschreibung der Dehnviskosität zurückgeführt werden, die das Verhalten des Kunststoffes während der Umformung beschreiben. Zur Simulation der Temperaturprofilierung sollten daher bei der Erstellung und Ausarbeitung des Materialmodells zur Beschreibung der Dehnviskosität eine feinere Auflösung gewählt werden - die Darstellung des Dehnviskosität mittels drei verschiedener Folientemperaturen sowie Dehnraten scheint zu nicht hinreichend genau Ergebnissen zu führen. Sowohl in der Simulation als auch in Experimenten konnte festgestellt werden, dass die Formung von teilkristallinem PP deutlich anspruchsvoller ist als die vom amorphen PS [Bei10]. Insbesondere die Beschreibung der Dehnviskosität in den Simulationen führte nicht zu den real erzeugten Wanddickenverteilungen. Dies stützt die Aussage, dass das Materialverhalten detaillierter in der Simulation beschrieben werden sollte.

Insgesamt zeigte sich, dass die Wanddickenverteilung der Formteile durch die aktive Kühlung beeinflussbar ist. Durch die Ergebnisse können die kmU der Thermoformbranche ihre Wettbewerbsfähigkeit steigern, indem sie die Materialeffizienz und somit Nachhaltigkeit ihrer Formteile sowie Prozesse steigern. Selbst bei einer leicht verlängerten Zykluszeit können Materialeinsparungen zu effizienteren und wirtschaftlicheren Prozessen führen [WL19]. In zukünftigen Forschungsprojekten ist vor allem die Verbesserung Beschreibung der Dehnviskosität von besonderer Bedeutung, um die Simulationsgüte zu erhöhen. Weiterhin ist die Betrachtung von PP-Folien sowohl in experimentellen als auch in simulativen Untersuchungen interessant, da PP eine immer größere Anwendung im Bereich der Verpackungsanwendungen findet. Für große Formteile mit großen Folienflächen wird empfohlen, den Einfluss des Foliendurchhangs weiter zu betrachten sowie geeignete Lösung zum Ausgleich des Foliendurchhangs zu erarbeiten. Weiterhin ist die Übertragung des generierten Prozesswissen auf industrielle Prozesse interessant, um die Leistungsfähigkeit der lokalen aktiven Kühlung gegenüber der klassischen Vorstreckstempeltechnik zu quantifizieren.

11 ABKÜRZUNGEN, FORMELZEICHEN, INDIZES

11.1 Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
DSC	Differential Scanning Calorimetry
GPPS	General Purpose Polystyrol
HIPS	High Impact Polystyrol
J	Joule
K	Kelvin
kg	Kilogramm
m	Meter
mm	Millimeter
MP	Messposition
aPET	Amorphes Polyethylenterephthalat
PP	Polypropylen
PS	Polystyrol
PTFE	Polytetrafluorethylen
R	Radius
W	Watt

11.2 Formelzeichen

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
I	[-]	Invariante
\dot{Q}	[W]	Wärmestrom
T	[°C]	Temperatur
α	[W/m ² K]	Wärmeübergangskoeffizient
λ	[-]	Verstreckgrad

11.3 Indizes

Index	Bedeutung
B	Bruch
H	Halbzeug
S	Stempel
1	Erste Invariante, Raumrichtung x
2	Zweite Invariante, Raumrichtung y
3	Dritte Invariante, Raumrichtung z

12 EINSATZ VON GERÄTEN, WISSENSCHAFTLICH TECHNISCHEM PERSONAL UND LEISTUNGEN DRITTER

Für den Versuchsaufbau wurden im Zuge dieses Forschungsvorhabens folgende Geräte beschafft, konfiguriert, in Betrieb sowie folgende Leistungen Dritter in Anspruch genommen:

Leistungen Dritter:

- Die Durchführung von TDO-Versuchen wurde erfolgreich durchgeführt. Es konnten für die verwendeten Materialien Polystyrol sowie Polypropylen Verstreckgrad-Spannungs-Diagramm ermittelt werden. Die Versuche wurden auf dem Reckrahmen der Queens University Belfast, Belfast, Irland, durchgeführt. Die Materialcharakterisierung durch das Ermitteln des Materialverhaltens bei verschiedenen Verformungsgeschwindigkeiten sowie Folientemperaturen sowie das anschließende Fitting der Daten an das verwendete Yeoh-Materialmodell zur Beschreibung der Dehnviskosität konnte erfolgreich durchgeführt werden. Der Einsatz sowie die Darstellung des Materialverhaltens in der Simulation war erfolgreich und führte zu physikalisch sinnvollen Ergebnissen. Bei weiteren Forschungsprojekten bzw. beim Aufbau einer Simulation der aktiven Kühlung sollte lediglich das Prozessfenster kleinschrittiger abgebildet werden, damit die Simulationsgüte erhöht werden kann. So können quantitativ hochwertigere Ergebnisse erzielt werden.

Gerätebeschaffungen:

- Durch die Beschaffung des Aggregats zur lokalen Halbzeugtemperierung konnten Temperaturprofile auf der Folie erfolgreich realisiert werden. Die Temperierung der Folie ist mit verschiedenen Medien wie bspw. Wasser und Kohlenstoffdioxid möglich.

Wissenschaftlich technisches Personal:

- Der Personaleinsatz umfasste 23 Mannmonate mit abgeschlossener wissenschaftlicher Ausbildung, 46 Mannmonate studentische Mitarbeiter und 2 Mannmonate Angestellter mit abgeschlossener technischer Ausbildung gemäß der Planung im Antrag. Der wissenschaftliche Mitarbeiter war erforderlich, um die wissenschaftliche Fragestellung zu erarbeiten, Problemstellungen in Abstimmung mit Vertretern aus Wirtschaft und Industrie zu diskutieren und Studierende zu betreuen, die im Rahmen des Vorhabens wissenschaftliche Arbeiten durchführten. Der technische Angestellte wurde für die Erweiterung der Anlagentechnik um das Temperieraggregat sowie Anpassung der Steuerungstechnik eingesetzt. Die studentischen Mitarbeiter unterstützten kontinuierlich bei der Durchführung der Versuche, dem Aufbau der Simulation, der Durchführung der Simulationen sowie der Aufbereitung und Visualisierung der ermittelten Ergebnisse.

13 WIRTSCHAFTLICHE BEDEUTUNG FÜR KMU

13.1 Möglicher Beitrag zur Steigerung der Leistungs- und Wettbewerbsfähigkeit der kmU

Der im Rahmen des Forschungsvorhabens entwickelte Leitfaden sowie die Zusammenfassung der Einflüsse verschiedener Prozessparametereinstellungen zur Anpassung der Wanddickenverteilung durch eine aktive Kühlung ist dazu geeignet, die sich einstellende Wanddickenverteilung verbessern zu können. Dadurch ist der Leitfaden auch dazu geeignet, die Materialeffizienz der Formteile und somit der Gesamteffizienz des Prozesses zu steigern, wenn eine homogene Wanddickenverteilung angestrebt wird und der Einsatz von dünneren Folien möglich ist. Dünnere Folien steigern die Gesamteffizienz, da weniger Material aufgeheizt bzw. abgekühlt werden muss. Durch den Leitfaden und die Empfehlungen können die Wanddickenverteilungen weiterhin besser abgeschätzt werden, sodass die Entwicklung neuer Kühlstempel verkürzt werden kann, auch wenn die Ausprägungen der Effekte von den verwendeten Materialien abhängig sind. Die Übertragung auf andere Materialien sowie Bechergeometrien ist jedoch im Allgemeinen möglich, wobei sich eine unterschiedlich starke Ausprägung der verschiedenen Prozessparameter, insbesondere der Kontaktzeit, einstellt. Der Leitfaden bzw. die Simulationen bestätigen eindeutig, dass eine Steuerung und damit Homogenisierung der Wanddickenverteilung möglich ist. Dies kann die Wirtschaftlichkeit der Prozesse erhöhen und somit neben der verkürzten Dauer der Kühlstempelkonstruktion sowie Inbetriebnahme der aktiven Kühlung zu einem Wettbewerbsvorteil führen. Der Leitfaden sowie die Zusammenfassung ist hauptsächlich für Anwendungen im Verpackungsbereich geeignet. Für die Übertragung auf technische Formteile müssen weitere Untersuchungen durchgeführt werden, wobei davon ausgegangen werden kann, dass sich die grundlegenden Effekte nicht unterscheiden werden. Inwieweit sich die Kühlstempeltechnik gegenüber der klassischen Vorstreckstempeltechnik durchsetzen wird, ist schwer vorherzusagen. Durch die Verlängerung der Zykluszeit des Gesamtprozesses durch den Bedarf einer zusätzlichen Kontaktzeit zwischen Kühlstempel und Folie wird die Produktivität des Prozesses verringert. Allerdings ergeben sich durch die Einsparungen des Kunststoffes durch eine verbesserte Wanddickenverteilung und die Möglichkeit dünnere Folien einzusetzen nachhaltigere und materialspezifisch verbesserte Produkte, sodass der wirtschaftliche Nutzen individuell beurteilt werden muss. Gegenüber der klassischen Vorstreckstempelauslegung im Thermoformen ist die Anpassung der lokalen Verstreckgrade durch lokal unterschiedliche Folientemperaturen flexibler, da durch lokal unterschiedliche Kühlstempelabstände zur Folie flexiblere Anpassungen möglich sind. Durch die gegenüber der klassischen Vorstreckstempeltechnik hauptsächlich freien Verstreckung nur mit Formluft können die

lokalen Verstreckungen gegenüber über einer mechanischen Verstreckung flexibler erzeugt werden. Somit ist zu erwarten, dass der Einsatz für Kühlstempel insbesondere bei komplexeren Formteilgeometrien erfolgt, bei denen die Anpassung der Wanddickenverteilung mittels klassischen Vorstreckstempeln nicht erzielt werden kann. Beispiele für solche Anwendungen können komplexe technische Formteile sein, bei denen lokal stark unterschiedliche Verstreckgrade erzeugt werden müssen, oder Formteile bei denen dicke Folien bzw. Platten verwendet werden müssen. Für diesen Anwendungsfall müssen jedoch weitere Untersuchungen hinsichtlich der Reproduzierbarkeit der Temperaturprofile bei dickeren Folien/Platten durchgeführt werden, um gleichbleibende Formteilqualitäten sicherzustellen.

Die Forschungsergebnisse können prinzipiell in der gesamten Thermoformbranche genutzt werden. Neben den thermoformenden Betrieben profitiert auch der durch kmU geprägte Werkzeugbau sowie Softwareentwickler von Thermoformsimulationen, die den Leitfaden zur Hilfe nehmen und umsetzen können. Ferner können die Ergebnisse des Vorhabens als Grundlage zur Weiterentwicklung detaillierter Leitfäden genutzt werden, wenn weitere Geometrien sowie Folienmaterialien und Prozesseinstellungen untersucht wurden. Somit können die Ergebnisse branchenübergreifend von einer großen Anzahl von kmU genutzt werden. Zur erfolgreichen Umsetzung einer angepassten Wanddickenverteilung zur Steigerung der Materialeffizienz durch den Einsatz der aktiven Kühlung ist jedoch stets eine Anpassung der Prozessparameter an die Produktionsumgebung nötig. Dazu kann die in diesem Forschungsbericht dargelegte Vorgehensweise zum Aufbau der Simulation bzw. die Zusammenfassung der Ergebnisse wichtige Erkenntnisse und Ansatzpunkte liefern.

13.2 Aussagen zur voraussichtlichen industriellen Nutzung der FuE-Ergebnisse nach Projektende

Nach Abschluss des Forschungsvorhabens werden interessierte Unternehmen anhand des Abschlussberichts, Veröffentlichungen und Präsentationen über die erzielten Erkenntnisse detailliert informiert und können dieses Wissen bereits in ihre eigenen Entwicklungsprozesse einbeziehen. Dabei besteht zusätzlich die Möglichkeit, in ergänzenden bilateralen Projekten z. B. im ZIM-Programm mit der Forschungsstelle eine konkrete Umsetzung bzw. Weiterentwicklung des Leitfadens zu erarbeiten. Die große Bandbreite an möglichen Anwendungen und Produkten für die verschiedensten Bereiche, jedoch insbesondere für Verpackungsbranche, das enorme Potenzial zur Materialeinsparung lässt eine Umsetzung in weitere konkrete Produkte innerhalb der nächsten zwei bis drei Jahre nach Projektabschluss erwarten.

14 PLAN ZUM ERGEBNISTRANSFER IN DIE WIRTSCHAFT

Zur Sicherstellung des Transfers der Forschungsergebnisse wurden verschiedene Maßnahmen während der Laufzeit des Projekts durchgeführt und weitere Maßnahmen sind nach dessen Abschluss geplant. Diese werden im Folgenden dargestellt.

Während der Projektlaufzeit durchgeführte Transfermaßnahmen:

Maßnahme: Projektbegleitender Ausschuss	Zeitraumen: 30.10.2019, 15.01.2021 und 25.06.2021
<p>Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens fand ein intensiver Dialog mit den Teilnehmern des Projektbegleitenden Ausschusses statt. Um eine breite Umsetzung der Projektergebnisse zu erzielen, spiegelte der Ausschuss den potenziellen Nutzerkreis wider. So war in diesem Ausschuss die gesamte Prozesskette zur Herstellung von thermogeformten Produkten vertreten: Anlagen- und Werkzeugbauer, Softwareentwickler, Rohstoffhersteller und Verarbeiter sowie Dienstleister. Über die Projektlaufzeit wurden mehrere Ausschusstreffen durchgeführt, bei denen mit den Teilnehmern die Zielsetzung, die Zwischenergebnisse und Endergebnisse intensiv diskutiert wurden. Dabei konnten die Unternehmen ihr spezifisches Knowhow gewinnbringend einbringen. Auf Basis dieses intensiven Dialogs konnten die Firmen das erworbene Wissen in ihre betriebliche Praxis übernehmen.</p> <p><i>Die Treffen des Projektbegleitenden Ausschusses fanden am 30.10.2019 in Aachen sowie am 15.01.2021 und 25.06.2021 aufgrund der Corona-Pandemie online via Zoom-Meeting statt.</i></p>	
Maßnahme: Fachbeiratsgruppe	Zeitraumen: 04.11.2019
<p>In den jährlich stattfindenden Fachbeiratsgruppen (FBG) des Instituts für Kunststoffverarbeitung wurden den Mitgliedern der Fördervereinigung des Instituts die aktuellen Forschungsvorhaben vorgestellt und gemeinsam diskutiert. Das Forschungsprojekt wurde in der Fachbeiratsgruppe „Blasformen“ vorgestellt, in der die Mitglieder der Thermoform- und Blasformbranche organisiert sind. Somit wurde der potenzielle Nutzerkreis des Vorhabens direkt angesprochen. Des Weiteren konnten über die intensive Diskussion in diesem Forum neue Aspekte im Forschungsprojekt berücksichtigt und somit die industrielle Relevanz des Forschungsvorhabens weiter akzentuiert werden.</p> <p><i>Das Projekt wurde bereits am 04.11.2019 in einem Fachvortrag den Mitgliedern der FBG vorgestellt. Dabei wurde mit Mitgliedern der FBG über die Forschungsinhalte, das Vorgehen und die bereits ermittelten Ergebnisse diskutiert und die Inhalte entsprechend vermittelt.</i></p>	
Maßnahme: Wissenschaftliche Publikationen	Zeitraumen: Zwischenergebnisse während der Laufzeit des Projekts
<p>Die Ergebnisse des Forschungsprojekts wurden in Form von Veröffentlichungen in nationalen Fachzeitschriften einem breiten Publikum vorgestellt.</p> <p>2020:</p> <p>Zeitschriftenbeiträge:</p> <p>1. HOPMANN, CH.; BALCEROWIAK, D.; FACKLAM, M.: Steuerung von Wanddickenverteilungen thermogeformter Becherformteile durch Einsatz einer lokalen Kühlung mittel Kühlstempel. <i>Extrusion</i> 26 (2020) 8, S. 32 – 37</p>	

Maßnahme: Dialog mit Fachpersonal der Wirtschaft	Zeitraumen: Jährlich / zweijährig / dreijährig
<p>Die Ergebnisse des Forschungsprojekts wurden mit Herstellern von Halbzeugen, Thermoformwerkzeugen und -maschinen, Verarbeitern und Mitarbeitern von Ingenieurbüros diskutiert. Dies erfolgte sowohl durch Besuche vor Ort als auch durch turnusmäßig stattfindende Fachgespräche im Rahmen der jährlich durchgeführten Fachbeiratsgruppen, des zweijährig durchgeführten Internationalen Kolloquiums Kunststofftechnik des IKV, nationalen sowie internationalen Messen und der vom bzw. mit dem IKV durchgeführten Fachtagungen. Dabei wurden Unternehmen, die zum potenziellen Nutzerkreis dieses Forschungsvorhabens gehören, gezielt angesprochen.</p> <p><i>Auf dem „30. Internationalen Kolloquium Kunststofftechnik“ am 08.09. bis 11.09.2020 in Aachen wurde mit zahlreichen Industrievertretern und Wissenschaftlern über das Projekt in sogenannten Breakout-Sessions diskutiert. Zudem fand vom 16. bis 23.10.2019 in Düsseldorf die „K-Messe“ statt, die ebenfalls zum intensiven Dialog mit industriellen Vertretern genutzt wurde. Des Weiteren wurde bei der Teilnahme an diversen Fachtagungen mit Fachpersonal der Dialog gesucht, um die Ergebnisse und das weitere Vorgehen zu diskutieren.</i></p>	
Maßnahme: Vorträge und Posterpräsentationen, Kurzbeiträge	Zeitraumen: Kontinuierlich während der Laufzeit
<p>Durch Vorträge und Posterpräsentationen auf Seminaren, Fachtagungen sowie der FBG und Rundgängen durch die Technika des IKV wurde das Fachpublikum direkt angesprochen.</p> <p><i>Zwischenergebnisse des Projektes wurden am 04.11.2019 in der Fachbeiratsgruppe vor einem Fachpublikum präsentiert. Teilergebnisse wurden bei Führungen und Besichtigungen des IKV Extrusionstechnikums bei diversen internen Veranstaltungen präsentiert. Weiterhin wurden das Projekt durch die Bereitstellung eines Kurzbeitrags in der „IKV Insight“ einem breiten Publikum vorgestellt.</i></p>	
Maßnahme: Akademische Lehre / Personaltransfer	Zeitraumen: Während der Laufzeit
<p>An der Bearbeitung der Aufgabenstellung waren Studenten als Hilfskräfte beteiligt. Zusätzlich wurden Bachelor- und Projektarbeiten sowie ein Forschungslabor zu dem Themenkomplex erstellt. Die Studenten kamen vornehmlich aus den Studienrichtungen Maschinenbau, Materialwissenschaften und Wirtschaftsingenieurwesen. Das erarbeitete Wissen können die Studenten als junge Ingenieure in die betriebliche Praxis übernehmen. Die erarbeiteten Erkenntnisse floßen zusätzlich in die Lehrveranstaltungen des Instituts ein und wurden somit auch auf diesem Wege Bestandteil der wissenschaftlichen Ausbildung junger Ingenieure.</p> <p><i>So wurden die Erkenntnisse dieses Forschungsprojekts in die Vorlesungen „Kunststoffverarbeitung 1“, „Fügen und Umformen von Kunststoffen“ sowie „Werkstoffkunde der Kunststoffe“ der Vertiefungsrichtung Kunststofftechnik genutzt. Dissertation für den bearbeitenden wissenschaftlichen Mitarbeiter: Nach Abschluss des Vorhabens besteht die Möglichkeit zur Promotion auf dem bearbeiteten Vorhaben.</i></p>	

Nach der Projektlaufzeit durchgeführte Transfermaßnahmen:

Maßnahme: Wissenschaftliche Publikationen	Zeitraumen: Nach der Laufzeit des Projekts
<p>Die Ergebnisse des Forschungsprojekts werden nach der Projektlaufzeit in Form von Veröffentlichungen in nationalen Fachzeitschriften sowie Konferenzen einem breiten Publikum weiter vorgestellt.</p> <p>Zeitschriftenbeiträge: 2021:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. <i>Hopmann, Ch.; Balcerowiak, D.; Facklam, M.:</i> Einen kühlen Kopf bewahren - Kühlstempel ermöglichen eine lokale Anpassung der Wanddickenverteilung im Thermoformen. <i>Kunststoffe</i> 111 (2021) 10, S. 128 - 131 (Abschlussveröffentlichung ist zum Zeitpunkt des Verfassens des Berichts noch nicht erschienen) 	
Maßnahme: Dialog mit Fachpersonal der Wirtschaft	Zeitraumen: Jährlich / zweijährig / dreijährig nach der Laufzeit
<p>Die Ergebnisse des Forschungsprojekts werden mit Herstellern von Halbzeugen, Thermoformwerkzeugen und -maschinen, Verarbeitern und Mitarbeitern von Ingenieurbüros diskutiert. Dies erfolgt weiterhin sowohl durch Besuche vor Ort als auch durch turnusmäßig stattfindende Fachgespräche im Rahmen der jährlich durchgeführten Fachbeiratsgruppen, des zweijährig durchgeführten Internationalen Kolloquiums Kunststofftechnik des IKV, nationalen sowie internationalen Messen und der vom bzw. mit dem IKV durchgeführten Fachtagungen. Dabei werden Unternehmen, die zum potenziellen Nutzerkreis dieses Forschungsvorhabens gehören, gezielt angesprochen.</p> <p><i>Auf dem „31. Internationalen Kolloquium Kunststofftechnik“ am 16.03. und 17.03.2022 in Aachen werden mit zahlreichen Industrievertretern und Wissenschaftlern die Ergebnisse des Projekts diskutiert und ein Teil der Ergebnisse in einem Fachvortrag präsentiert.</i></p> <p><i>Zudem findet im Oktober 2022 die K-Messe in Düsseldorf statt, auf der mit den verschiedenen Fachunternehmen und Fachleuten der Dialog gesucht wird.</i></p> <p><i>Des Weiteren wird weiterhin bei der Teilnahme an diversen Fachtagungen mit Fachpersonal der Dialog gesucht, um die Ergebnisse zu diskutieren und den Transfer zu intensivieren.</i></p>	
Maßnahme: Vorträge und Posterpräsentationen	Zeitraumen: Kontinuierlich nach der Laufzeit
<p>Durch Vorträge und Posterpräsentationen auf Seminaren, Fachtagungen sowie der FBG und Rundgängen durch die Technika des IKV werden das Fachpublikum sowie Studierende direkt angesprochen.</p> <p><i>Grundlegende Ergebnisse des Projektes werden somit dauerhaft auch nach der Laufzeit vor einem Fachpublikum präsentiert.</i></p>	
Maßnahme: Akademische Lehre / Personaltransfer/ Dissertation	Zeitraumen: Kontinuierlich nach der Laufzeit
<p>Die Ergebnisse werden in verschiedenen Veranstaltungen der Lehre am IKV den Studierenden übermittelt. Die Studierenden kommen vornehmlich aus den Studienrichtungen Maschinenbau, Materialwissenschaften und Wirtschaftsingenieurwesen. Das erarbeitete Wissen können die Studierenden weiterhin als junge Ingenieure in die betriebliche Praxis übernehmen, sodass weiterhin die Informationen in der Vorlesung thematisiert werden.</p> <p><i>So werden die Erkenntnisse dieses Forschungsprojekts in die Vorlesungen „Kunststoffverarbeitung 1“ und „Fügen und Umformen von Kunststoffen“ der Vertiefungsrichtung Kunststofftechnik genutzt.</i></p>	

Dissertation für den bearbeitenden wissenschaftlichen Mitarbeiter: Nach Abschluss des Vorhabens besteht die Möglichkeit zur Promotion auf dem bearbeiteten Vorhaben.

Maßnahme:
Forschungsbericht

Zeitraumen:
2. Quartal nach Abschluss des
Forschungsvorhabens

Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens sind in diesem Forschungsbericht dokumentiert. Dieser Forschungsbericht wird interessierten Unternehmen zur Verfügung gestellt und ermöglicht somit den Zugang zu den gewonnenen Erkenntnissen. Diese können von den Unternehmen in die betriebliche Praxis übernommen werden.

15 EINSCHÄTZUNG DER REALISIERBARKEIT DES VORGESCHLAGENEN UND AKTUALISIERTEN TRANSFERKONZEPTS

Innerhalb der drei Sitzungen des projektbegleitenden Ausschusses, der Darstellung der Ergebnisse auf den IKV-Fachbeiratsgruppensitzungen sowie durch direkten Dialog mit Fachpersonal der Wirtschaft war es möglich, den Projektfortschritt und die Projektergebnisse kontinuierlich und direkt Vertretern interessierter Industrieunternehmen zu kommunizieren und zu diskutieren. Durch Hinweise in der Fachpresse, wissenschaftliche Publikationen sowie der IKV-Insight in Form von Veröffentlichungen, dem Forschungsbericht sowie durch Vorträge konnte zusätzlich ein breites Fachpublikum angesprochen werden. Die gewonnenen Erkenntnisse sind darüber hinaus in die Lehre eingeflossen, um angehenden Ingenieuren potenzielle Möglichkeiten neuer Technologien und Verfahren vorzustellen. Sowohl in Lehrveranstaltungen als auch studentischen Arbeiten konnten sich die Studierenden umfassend mit der Thematik vertraut machen und ihre ingenieurtechnischen Fähigkeiten vertiefen.

Mit dem breitgefächerten Transferkonzept konnte somit das Ziel erreicht werden, die im Rahmen des Forschungsvorhabens erarbeiteten Ergebnisse einem breiten industriellen Nutzerkreis vorzustellen und als Grundlage für weitere Entwicklungsarbeiten zur Verfügung zu stellen. In Zukunft werden darüber hinaus die Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens die Grundlage für bilateraler Industrieprojekte oder Beratungen zur Optimierung der Materialeffizienz bzw. der Stempelver Streckung allgemein darstellen.

Die Realisierbarkeit des vorgeschlagenen Konzeptes ist somit gegeben.

16 NOTWENDIGKEIT UND ANGEMESSENHEIT DER DURCHGEFÜHRTEN ARBEITEN

In diesem Forschungsvorhaben wurde die Beschaffung des Aggregats zur lokalen Halbzeugtemperierung durchgeführt und die Anlage um dieses Aggregat erweitert. Durch die Verwendung von Kühlstempeln und der Analyse verschiedener Geometrien sowie Prozesseinstellungen ist es gelungen, die Wanddickenverteilung anzupassen und somit entsprechend das Potenzial zur Steigerung der Materialeffizienz aufzuzeigen. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass die Simulation der aktiven Kühlung im Thermoformen möglich ist. Zur Durchführung der Simulation war die Ermittlung der materialspezifischen Stoffdaten sowie die Durchführung von TDO-Versuchen an der Queens University Belfast, Belfast, Irland zwingend notwendig. Insgesamt wurde bewiesen, dass der aus den Ergebnissen der Wanddickenverteilungen ermittelte Leitfaden auf andere Materialien prinzipiell übertragen werden kann, allerdings unterschiedlich starke Auswirkungen des temperaturabhängigen sowie dehnratenabhängigen Materialverhaltens bzw. der Dehnviskosität auf die Ausformung und somit die Wanddickenverteilung aufzeigt. So ist zwar die Anpassung der Wanddickenverteilung in gleicher Vorgehensweise möglich, jedoch ist bspw. eine Anpassung der Kontaktzeit unabdingbar. Das in dem Vorhaben erarbeitete Prozesswissen sowie der Leitfaden zum Aufbau der Simulation der aktiven Kühlung im Thermoformen bilden eine wichtige Grundlage, dass Thermoformbetriebe die aktive Kühlung schneller und kosteneffizienter in ihrem Produktionsbetrieb erproben bzw. in die Nutzung überführen können. Die durchgeführten Arbeiten waren somit notwendig und angemessen.

17 LITERATUR

- [App05] APFEL, O.: Wachstumsmarkt mit Zukunft. *Kunststoffe* 95 (2005) 9, S. 78-84
- [BCS14] BACH, S.; CLAUS, R.; STEIN, M.: New perspectives in thermoforming by an innovative heating technology and process simulation. *Dokumentation zur UBE Conference Change & Challenge Summit 2014*, Düsseldorf, 07.05.2014
- [Bei10] BEILHARZ, F.: *Einfluss der Herstellungsbedingungen von PP-Halbzeugen auf die Thermoformeigenschaften*. Technische Universität Stuttgart, Dissertation, 2010
- [BS16] BAEHR, H.; STEPHAN, K.: *Wärme- und Stoffübertragung*. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2016
- [CHM02] COLLINS, P.; HARKIN-JONES, E. M. A.; MARTIN, P. J.: The Role of Tool/Sheet Contact in Plug-assisted Thermoforming. *International Polymer Processing*, 17 (2002) 4, S. 361 - 369
- [CSB+13] CLAUS, R.; STEIN, M.; BACH, S.; MAJSCHAK, J.-P.; PARTSCH, U.; GRIESSMANN, H.: An Innovative Contact Heating Method in the Thermoforming Process. Proceedings of the EUROTECH 2013 Conference, Lyon, Frankreich, 2013
- [DC04] DUARTE, F.; COVAS, J.: On the Use of the Heating Stage to Control the Thickness Distribution in Thermoformed Parts. *International Polymer Processing* 19 (2004) 2, S. 186 - 198
- [Det01] DETROIS, C.: *Untersuchungen zur Dehnrheologie und Verarbeitbarkeit von Halbzeugen beim Thermoformen*. RWTH Aachen, Dissertation, 2001
- [DM20] DISPAN, J.; MENDLER, L.: *Branchenanalysen kunststoffverarbeitende Industrie 2020. Beschäftigungstrends, Kreislaufwirtschaft, digitale Transformation*. Working Paper Forschungsförderung, Nummer 186, Hans Böckler Stiftung, Düsseldorf, 2020
- [DRA+08] DAWSON, A.; RIDES, M.; ALLEN, C.R.G.; URQUHART, J.M.: Polymer–mould interface heat transfer coefficient measurements for polymer processing. *Polymer Testing* 27 (2008) 5, 2008, p. 555 - 565
- [Ede15] EDERLEH, L.: *Simulative und experimentelle Untersuchungen zum Umformverhalten thermoplastischer Kunststoffe beim Thermoformen*. RWTH Aachen, Dissertation, 2015, ISBN: 978-3-95886-026-1
- [FG18] FRAUENSCHUH, C.; GIGLMAIER, R.: Zur richtigen Zeit am richtigen Ort. *Kunststoffe* 108 (2018) 10, S. 167 - 170
- [Har97] HARTWIG, K.: *Simulation des Streckblasverfahrens und Charakterisierung des rozeßrelevanten Materialverhaltens*. Institut für Kunststoffverarbeitung, RWTH Aachen, Dissertation, 1997 – ISBN: 3-89653-401-7
- [HBF20] HOPMANN, CH.; BALCEROWIAK, D.; FACKLAM, M.: Analyse der Einflüsse von Stempelgeometrie und der Folientemperatur auf die resultierende Wanddickenverteilung thermogeformter Becherformteile. *Extrusion* 26 (2020) 5, S. 34 - 38
- [HBF21] HOPMANN, CH.; BALCEROWIAK, D.; FACKLAM, M.: Einen kühlen Kopf bewahren - Wanddickenverteilung beim Thermoformen durch Kühlstempel anpassen. *Kunststoffe* 111 (2021) 10, S. 128 - 131
- [HM16] HOPMANN, C.; MARTENS, J.: Profiliert Material beim Thermoformen sparen. *Kunststoffe* 106 (2016) 9, S. 15 – 19
- [HM17] HOPMANN, CH.; MICHAELI, W.: *Einführung in die Kunststoffverarbeitung*. München: Carl Hanser Verlag, 2017, ISBN: 978-3-446-44627-4

- [HMB17] HOPMANN, CH.; MARTENS, J.; BALCEROWIAK, D.: Analyse der Temperaturprofilierung durch Masken zur Steigerung der Materialeffizienz im Thermoformen. *Zeitschrift Kunststofftechnik*. 13 (2017) 2, S. 126 - 143
- [Hop17] HOPMANN, CH.: *Entwicklung eines einfach nachrüstbaren Verfahrens zur Profilierung der Halbzeugtemperatur zur Steigerung der Materialeffizienz im Thermoformen*. Institut für Kunststoffverarbeitung, RWTH Aachen, Abschlussbericht zum IGF-Forschungsvorhaben Nr. 17986 N, 2017
- [Hop19] HOPMANN, CH.: *Optimierung der Stempelverstreckung im Thermoformen zur Steigerung der Materialeffizienz*. Institut für Kunststoffverarbeitung, RWTH Aachen, Abschlussbericht zum IGF-Forschungsvorhaben Nr. 19342 N, 2019
- [HYT+18] HOPMANN, CH.; YESILDAG, N.; TWARDOWSKI, B.; SCHÄFER, S.; BALCEROWIAK, D.: *Rigid Packaging - Effizienz durch digitale Designprozesse*. Internationales 29. Kolloquium Kunststofftechnik, Aachen, 2018
- [IS16] ILLIG (HRSG.); SCHWARZMANN, P.: *Thermoformen in der Praxis*. München: Carl Hanser Verlag, 2016, ISBN: 978-3-446-44403-4
- [Leo11] LEOPOLD, T.: *Rechnergestützte Auslegung streckblasgeformter Kunststoffhohlkörper*. RWTH Aachen, Dissertation, 2011, ISBN: 3861302268
- [Leo17] LEOPOLD, T.: Unser Ziel bis 2030 heißt Faktor 3. *K-Profi* 9 (2017) 6, S. 6-8
- [MHMS11] MENGES, G., HABERSTROH, E., MICHAELI, W., SCHMACHTENBERG, E.: *Werkstoffkunde Kunststoffe*. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 2011
- [MMH+12] MARTIN, P.; MCCOOL, R.; HÄRTER, C.; CHOO, H.: *Measurement of polymer-to-polymer contact friction in thermoforming*. *Polymer Engineering and Science: Wiley Online Library*, 3 (2012) 52, S. 489 - 498
- [Mos13] MOSER, A.: *Nutzung von Prozesswissen beim Thermoformen von Verpackungen*. Universität Duisburg-Essen, Dissertation, 2013
- [NB12] NEUBIG, B.; BONTEN, C.: Local heating using laser radiation for improved wall thickness distribution of thermoformed parts. *Proceedings of the Polymer Processing Society 28th Annual Meeting PPS*, Pattaya, Thailand, 2012
- [NB13] Neubig, B.; Bonten, C.: Laser verbessert Wanddickenverteilung. *Kunststoffe* 103 (2013) 5, S. 32 -36
- [NN09] N.N.: *FLIR A320 - Industrial Automation IR Camera*. Datenblatt, Datenblatt, FLIR Systems Co Ltd., Hong Kong, 2009
- [NN12] N.N.: *Abaqus Theory Manual, Version 6.12*. Providence, Rhode Island, USA: Dassault Systems Simulia Corp, 2012
- [NN14] N.N.: *optris CT LT*. Datenblatt, Datenblatt, Optris GmbH, Berlin, 2014
- [NN15] N.N.: *Das neue Magna-Mike*. Datenblatt, Datenblatt, Olympus Deutschland GmbH, Hamburg, 2015
- [NN16] N.N.: *Hochleistungs-Infrarot-Flächenstrahler*. Datenblatt, Datenblatt, Technical Quartz Solutions GmbH, Mainz, 2016
- [NN20] N.N.: *Plastics - the Facts 2020*. PlasticsEurope. Bericht, Brüssel, Belgien, 2020
- [Pap21] PAPALLA, M.: *Aufbau einer Simulation zur Berechnung und Analyse der resultierenden Wanddickenverteilung thermogeformter Becherformteile durch eine Temperaturprofilierung*

- mittels Kühlstempel*. Institut für Kunststoffverarbeitung, RWTH Aachen, unveröffentlichte Bachelorarbeit, 2021 – Betreuer: D. Balcerowiak
- [Pol93] POLLER, S.: *Verbesserte Prozeßführung von Thermoformmaschinen*. RWTH Aachen, Dissertation, 1993, ISBN: 3-86073-076-2
- [RBH12] RASCHE, S.; BEGEMANN, M.; HOPMANN, CH.: Modelling IR-Heating in stretch blow moulding and thermoforming. *Proceedings of the ASME 2012 11th Biennial Conference On Engineering Systems Design And Analysis ESDA2012*. Nantes, Frankreich, 2012
- [SC16] SELKE, S.; CULTER, J.: *Plastics Packaging*. München: Carl Hanser Verlag, 2016
- [Sch15] SCHWARZMANN, P.: Typisch und unentbehrlich – Durch Vorformen die Wanddickenverteilung beim Thermoformen steuern. *Kunststoffe* 105 (2015) 4, S. 74 – 77
- [SFO+20] SOUZA, C.; FENG, J.; OLAH, A.; WNEK, G.; BAER, E.: Thermoformable high oxygen barrier multilayer EVOH/LDPE film/foam. *Journal of Applied Polymer Science* 137 (2020) 30, S. 1 - 10
- [TB99] THRONE, J.; BEINE, J.: *Thermoformen: Werkstoffe - Verfahren - Anwendungen*. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 1999
- [THG06] THIELEN, M.; HARTWIG, K.; GUST, P.: *Blasformen von Kunststoffhohlkörpern*. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 2006
- [WL19] WELLBROCK, W.; LUDIN, D.: *Nachhaltiges Beschaffungsmanagement: Strategien - Praxisbeispiele - Digitalisierung*. Wiesbaden: SpringerGabler Verlag, 2019
- [Yeo93] Yeoh, O.: Some Forms of the Strain Energy Function for Rubber. *Rubber Chemistry and Technology* 66 (1993) 5, S. 754-771

18 ANHANG

18.1 Skripte zur Übergabe der Folientemperatur sowie der Folienverformung durch den Kühlstempel

18.1.1 Verformung

```
# Importieren der Abaqus-Komponenten
# -*- coding: iso-8859-1 -*-
from odbAccess import *
from math import *
from abaqusConstants import *
import os
from array import *

def STH(inpath, outpath):

#open ODB File
    odb = openOdb(path=inpath,readOnly=1)
    datei=file(outpath,'w')

#Auslesen des 1 und letzten Frames der Simulation
    firstFrame = odb.steps['Step-1'].frames[0]
    lastFrame = odb.steps['Step-1'].frames[-1]

#Auslesen von der benötigten Subsets aus den Frames (Frame1: EVOL, Frame-
1:EVOL,COORD,STH)
    evol0=firstFrame.fieldOutputs['EVOL'].getSubset(position=WHOLE_ELEMENT)
    evol=lastFrame.fieldOutputs['EVOL'].getSubset(position=WHOLE_ELEMENT)
    coord=lastFrame.fieldOutputs['COORD'].getSubset(position=INTEGRATION_POINT)
    sth=lastFrame.fieldOutputs['STH'].getSubset(position=INTEGRATION_POINT)
    coordNodal=lastFrame.fieldOutputs['COORD'].getSubset(position=NODAL)
    ne=lastFrame.fieldOutputs['NE'].getSubset(position=INTEGRATION_POINT)
    le=lastFrame.fieldOutputs['LE'].getSubset(position=INTEGRATION_POINT)
    min_label=999999999
    max_label=0
    labelListDetailliert = []
    sthListDetailliert = []
```

```

sthListIKV = [0] * (14)
labelListIKV = []

# ----- ERSTELLEN DER LISTEN -----
count=0
segments = 36
labelListIKVtemp = []
dalpha = 360/36
i = 0

#[x,y,Label,Dicke] von Messpunkt 0 nach 13
messpunkte = [[0.03,0],[0.029399403,-0.004988238],[0.028798806,-
0.009976475],[0.028198209,-0.014964713],[0.027597612,-0.01995295],[0.026997015,-
0.024941188],[0.026396418,-0.029929425],[0.025795821,-0.034917663],[0.025078571,-
0.04],[0.020062857,-0.04],[0.015047143,-0.04],[0.010031429,-0.04],[0.005015714,-0.04],[0,-
0.04]]
while (dalpha*i+5) < 360:
    temparrayMesspunkte = []
    for messpunkt in messpunkte:
        bestLabel = 0
        bestX = 999
        bestY = 999
        bestZ = 999
        pi = 3.14159265359
        radius = messpunkt[0]
        optimalX = radius * cos((dalpha*i+5)*pi/180)
        optimalY = radius * sin((dalpha*i+5)*pi/180)
        optimalZ = messpunkt[1]
        bestDistance = abs((bestX-optimalX)*(bestX-optimalX)+(bestY-optimalY)*(bestY-
optimalY)+(bestZ-optimalZ)*(bestZ-optimalZ))
        for x in coord.values:
            currentLabel = x.elementLabel
            currentX = x.data[0]
            currentY = x.data[1]
            currentZ = x.data[2]
            currentDistance = abs((currentX-optimalX)*(currentX-optimalX)+(currentY-
optimalY)*(currentY-optimalY)+(currentZ-optimalZ)*(currentZ-optimalZ))

```

```

    if currentDistance < bestDistance:
        bestLabel = currentLabel
        bestX = currentX
        bestY = currentY
        bestZ = currentZ
        bestDistance = abs((currentX-optimalX)*(currentX-optimalX)+(currentY-
optimalY)*(currentY-optimalY)+(currentZ-optimalZ)*(currentZ-optimalZ))
        #print('Messpunkt ' + str(messpunkte.index(messpunkt)))
        #print('Label: ' + str(currentLabel) + ', geringste Distanz:' + str(bestDistance))
        #print('Messpunktkoord.:      x: ' + str(messpunkt[0]) + ', ' + ',      z: '
+str(messpunkt[1]))
        #print('Koordinaten:      x: ' + str(currentX) + ', ' + ',      z: ' +str(currentZ)+ '\n')
        #print (' -----')
        #print (' Ergebnis - beste Uebereinstimmung: ' + str(bestLabel))
        #print (' -----')
        temparrayMesspunkte.append(bestLabel)
        labelListIKVtemp.insert(i, temparrayMesspunkte)
        i = i + 1
        print(str(dalpha*i+5) + ' - ' + str(i))

countSegmentListen = 0
countMesspunktListen = 0
for ikvLabelList in labelListIKVtemp:
    for label in ikvLabelList:
        print(str(countSegmentListen) + ', ' + str(countMesspunktListen) + ': ' + str (label))
        countMesspunktListen = countMesspunktListen + 1
    countMesspunktListen = 0
    countSegmentListen = countSegmentListen + 1

countntt= 0
for x in sth.values:
    sth_label = x.elementLabel
    sth_value = x.data
    for ikvLabelList in labelListIKVtemp:
        ikvLabelListIndex = labelListIKVtemp.index(ikvLabelList)
        for label in ikvLabelList:
            if sth_label == label:

```

```

listIndex = ikvLabelList.index(label)
sthListIKV[listIndex] = sthListIKV[listIndex] + sth_value/segments/2
if listIndex == 5:
    print('Aktuelle Wanddicke bei Element ' + str(label) + ': ' +
str(sthListIKV[listIndex]))
    coutntt = coutntt+1

print(coutntt)
# ----- SCHREIBEN DER ERGEBNISSE -----
datei.write('; ' + 'Wanddicke' + '\n')
for e in sthListIKV:
    listIndex = abs(sthListIKV.index(e))
    _ikvNumber = abs(listIndex - 14)
    _sth = sthListIKV[listIndex] * 1000
    datei.write(str(_ikvNumber) + '; ' + format(_sth).replace(';',',') + '\n')
    print('Index: ' + str(listIndex) + '; ' + str(e) + '; ' + format(_sth).replace(';',','))

datei.close()

#Ende der Funktionsdefinitionen

#Beginn des eigentlichen Programms

#input and output path
inpath='umform.odb'
outpath='extracted\wanddicken.csv'

#Aufruf der Funktion STH() mit den entsprechenden Parametern
STH(inpath, outpath)

#Ende des Programms

```

18.1.2 Temperatur

```

# Importieren der Abaqus-Komponenten
# -*- coding: iso-8859-1 -*-
from odbAccess import *
import math
from abaqusConstants import *

```

```
import os

def STH(inpath, teilung):
# Dateien erstellen / lesen
    print ('1. Datenstrukturen anlegen...')
    dateiCoordinates=file('extracted/update_nodal_coords.inp','w')
    dateiTemperature=file('extracted/update_nodal_temp.inp','w')
    dateiSTH=file('extracted/update_nodal_sth.inp','w')
    dateiErgebnisTempElemental=file('extracted/temperatur_sheet.csv','w')
    dateiOriginalNodePositions = open('geometry/sheet.inp', 'r')

#open ODB File
    print ('2. ODB lesen...')
    odb = openOdb(path=inpath,readOnly=1)
    lastFrame = odb.steps['step_temp_disp'].frames[-1]

#Erstellen der benötigten Dateistrukturen
    print ('3. Verarbeitungsstrukturen erstellen...')
    # ausleselisten
    coord_shift_nodes=lastFrame.fieldOutputs['U'].getSubset(position=NODAL)
    sth_elements=lastFrame.fieldOutputs['STH'].getSubset(position=INTEGRATION_POINT)

temp_elements=lastFrame.fieldOutputs['TEMP'].getSubset(position=INTEGRATION_POIN
T)
    sheetFile = dateiOriginalNodePositions.readlines() #vorher 'Lines'

    label_nodes = []
    coordX_nodes = []
    coordY_nodes = []
    coordZ_nodes = []

    label_elements = []
    nodelabels_elements = []

    temperature_nodal = []
    sth_nodal = []
    count_nodal = []
```

```
# Erzeugen Node, Element und Nodeliste-Element Listen

print ('4. Nodekoordinaten ermitteln...')
for line in sheetFile:
    lineStripped = line.replace(" ", "")
    lineList = lineStripped.split(',')
    if lineList[0][:1] == '1' and len(lineList) == 4:
        label_nodes.append(lineList[0])
        coordX_nodes.append(float(lineList[1]))
        coordY_nodes.append(float(lineList[2]))
        coordZ_nodes.append(float(lineList[3]))
        temperature_nodal.append(0)
        sth_nodal.append(0)
        count_nodal.append(0)
    if lineList[0][:1] == '2' and len(lineList) == 5:
        label_elements.append(lineList[0])

nodelabels_elements.append(str(lineList[1])+' '+str(lineList[2])+' '+str(lineList[3])+' '+str(line
List[4]))

# Nodes: Koordinaten ermitteln
for i in label_nodes:
    for j in coord_shift_nodes.values:
        index_labelNodes = label_nodes.index(i)
        shiftLabel = j.nodeLabel
        shiftX = j.data[0]
        shiftY = j.data[1]
        shiftZ = j.data[2]
        if float(shiftLabel) == float(i):
            coordX_nodes[index_labelNodes] = coordX_nodes[index_labelNodes] + shiftX
            coordY_nodes[index_labelNodes] = coordY_nodes[index_labelNodes] + shiftY
            coordZ_nodes[index_labelNodes] = coordZ_nodes[index_labelNodes] + shiftZ

# Anzahl in Elementen bestimmen
for j in label_elements:
    _index_labelNodes = label_nodes.index(i)
    _index_labelElements = label_elements.index(j)
```

```

    _nodeList = nodelabels_elements[_index_labelElements].split(',')
    if float(_nodeList[0]) == float(i) or float(_nodeList[1]) == float(i) or
float(_nodeList[2]) == float(i) or float(_nodeList[3]) == float(i):
        count_nodal[_index_labelNodes] = count_nodal[_index_labelNodes] + 1

print ('5. Nodetemperaturen ermitteln...')
# Temperaturen und STH aus Elementinformationen ermitteln
for i in label_elements:
    _index_labelElements = label_elements.index(i)
    _nodeList = nodelabels_elements[_index_labelElements].split(',')
    _element_temp = 0
    _element_sth = 0

    singleEntry = 0
    for j in temp_elements.values:
        if float(j.elementLabel)==float(i) and singleEntry == 0:
            _element_temp = j.data
            singleEntry = 1

    singleEntry = 0
    for k in sth_elements.values:
        if float(k.elementLabel)==float(i):
            _element_sth = float(k.data)
            singleEntry = 1

    for l in label_nodes:
        _index_labelNodes = label_nodes.index(l)
        _count = count_nodal[_index_labelNodes]
        if float(_nodeList[0])==float(l):
            temperature_nodal[_index_labelNodes] = temperature_nodal[_index_labelNodes] +
            _element_temp/_count
            sth_nodal[_index_labelNodes] = sth_nodal[_index_labelNodes] +
            _element_sth/_count
        if float(_nodeList[1])==float(l):
            temperature_nodal[_index_labelNodes] = temperature_nodal[_index_labelNodes] +
            _element_temp/_count

```

```

        sth_nodal[_index_labelNodes] = sth_nodal[_index_labelNodes] +
_element_sth/_count
    if float(_nodeList[2])==float(1):
        temperature_nodal[_index_labelNodes] = temperature_nodal[_index_labelNodes] +
_element_temp/_count
        sth_nodal[_index_labelNodes] = sth_nodal[_index_labelNodes] +
_element_sth/_count
    if float(_nodeList[3])==float(1):
        temperature_nodal[_index_labelNodes] = temperature_nodal[_index_labelNodes] +
_element_temp/_count
        sth_nodal[_index_labelNodes] = sth_nodal[_index_labelNodes] +
_element_sth/_count

print ('6. Erstellen der Ergebnisse...')
# Nodes: Koordinaten ausgeben
dateiCoordinates.write('*node, nset=nodeset_sheet'+'\n')

print (' - Abaqus-Transferdaten')
for i in label_nodes:
    listIndex = label_nodes.index(i)
    _label = label_nodes[listIndex]

    #Koordinaten
    _coordX = coordX_nodes[listIndex]
    _coordY = coordY_nodes[listIndex]
    _coordZ = coordZ_nodes[listIndex]
    dateiCoordinates.write(str(_label) +', ' + format(_coordX).replace('!', '!')+ ', ' +
format(_coordY).replace('!', '!')+ ', ' + format(_coordZ).replace('!', '!') +'\n')
    #Temperaturen
    _temp = temperature_nodal[listIndex]
    dateiTemperature.write(str(_label) +', ' + format(_temp).replace('!', '!')+'\n')
    #STH
    _sth = sth_nodal[listIndex]
    dateiSTH.write(str(_label) +', ' + format(_sth).replace('!', '!')+'\n')

print (' - Exceldaten')
# Excelergebnisse

```

```

sheetRadius = float(0.03)
x = float(0)
y = float(0)
radius = []
temp = []
while x <= sheetRadius*1.001:
    oldDistance = float(100)
    _temp = float(0)
    for i in label_nodes:
        listIndex = label_nodes.index(i)
        _x = coordX_nodes[listIndex]
        _y = coordY_nodes[listIndex]
        pointDistance = math.pow(((x-_x)*(x-_x)+(y-_y)*(y-_y)), 0.5)
        if pointDistance < oldDistance:
            oldDistance = pointDistance
            _temp = temperature_nodal[listIndex]
    radius.append(math.pow((y*y+x*x), 0.5))
    temp.append(_temp-273.15)
    x = x + sheetRadius/float(teilung)

```

```

#ausdünnen
#radiusReduced = []
#tempReduced = []
#for entry in radius:
#    listIndex = radius.index(entry)
#    if listIndex > 0:
#        if radius[listIndex] > radius[listIndex-1]*1.03:
#            radiusReduced.append(radius[listIndex])
#            tempReduced.append(temp[listIndex])

```

```

dateiErgebnisTempElemental.write('Radius;Temp\n')
for entry in radius:
    listIndex = radius.index(entry)
    _radius = radius[listIndex]
    _temp = temp[listIndex]

```

```
dateiErgebnisTempElemental.write(format(_radius).replace('.',',')+format(_temp).replace('.',',')+'\n')
```

```
dateiCoordinates.close()  
dateiOriginalNodePositions.close()  
dateiTemperature.close()  
dateiErgebnisTempElemental.close()
```

```
teilung = 13  
inpath = 'wts.odt'  
STH(inpath, teilung)
```

18.2 Materialcharakterisierung und Modellierung

Das mechanische Verhalten eines Materials kann durch mathematische Modelle beschrieben werden. Die richtige Abbildung des Verstreckverhaltens ist für eine Vorhersagegenauigkeit der Simulation entscheidend [Ede15].

18.2.1 Ermittlung der Materialdaten - Reckrahmen

Um das mechanische Verhalten von Kunststofffolien zu untersuchen gibt es verschiedene etablierte Verfahren. Für dieses Projekt wurde das verwendete Polystyrol sowie Polypropylen mittels des Reckrahmens Queen's Biaxial Stretcher untersucht. Dabei wird ein quadratischer Probenzuschnitt mittels Klemmen fixiert und erwärmt. Danach wird die Probe äquibiaxial gedehnt. Die Verstreckung kann mit unterschiedlichen Dehngeschwindigkeiten und Temperaturen durchgeführt werden. Die entstehenden Spannungen werden gemessen und in einem Spannungs-Verstreckgrad-Diagramm ausgegeben. Die Spannungs-Verstreckgrade-Diagramme für die beiden verwendeten Kunststoffe sind in Bild 18.1 und Bild 18.2 dargestellt.

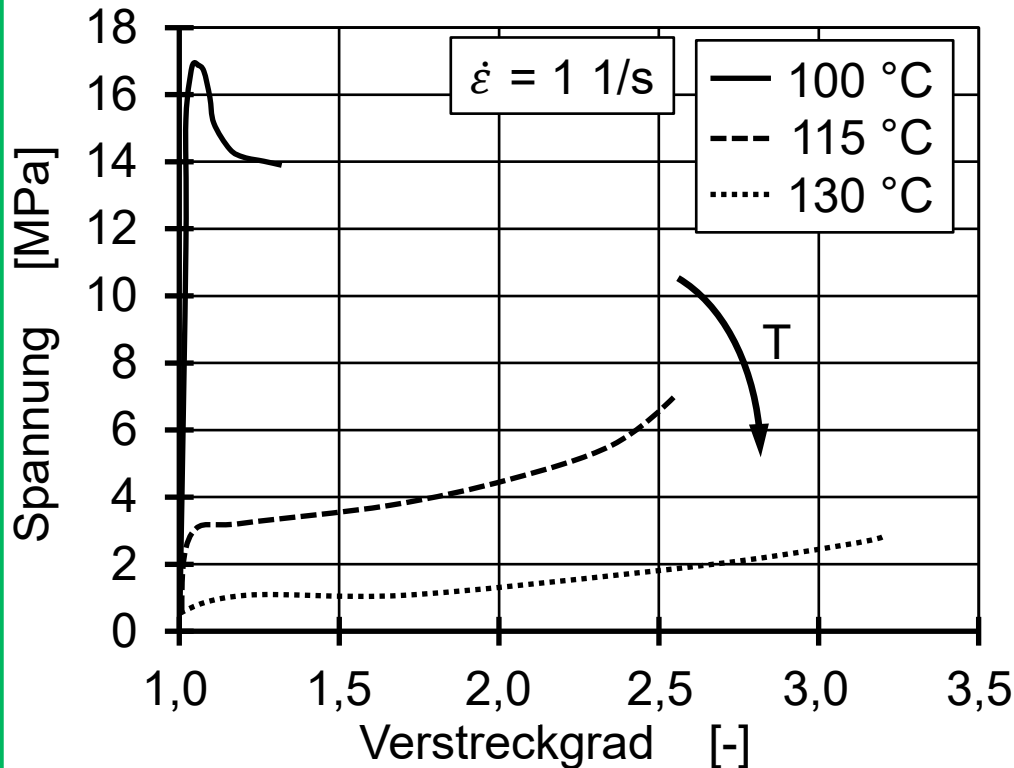
18.2.2 Hyperelastisches Materialmodell nach Yeoh

Im Folgenden wird die Modellierung des mechanischen Verhaltens des Halbzeugs beschrieben. Abaqus bietet dem Anwender diverse elastische, viskoelastische und hyperelastische Materialmodelle an. In Anlehnung an vorangegangene Arbeiten von [Ede15, Leo11] wird das hyperelastische Materialmodell nach dem Yeoh-Ansatz verwendet, das einen nichtlinear-elastischen, vollständig reversiblen und zeitunabhängiges Spannungs-Dehnungs-

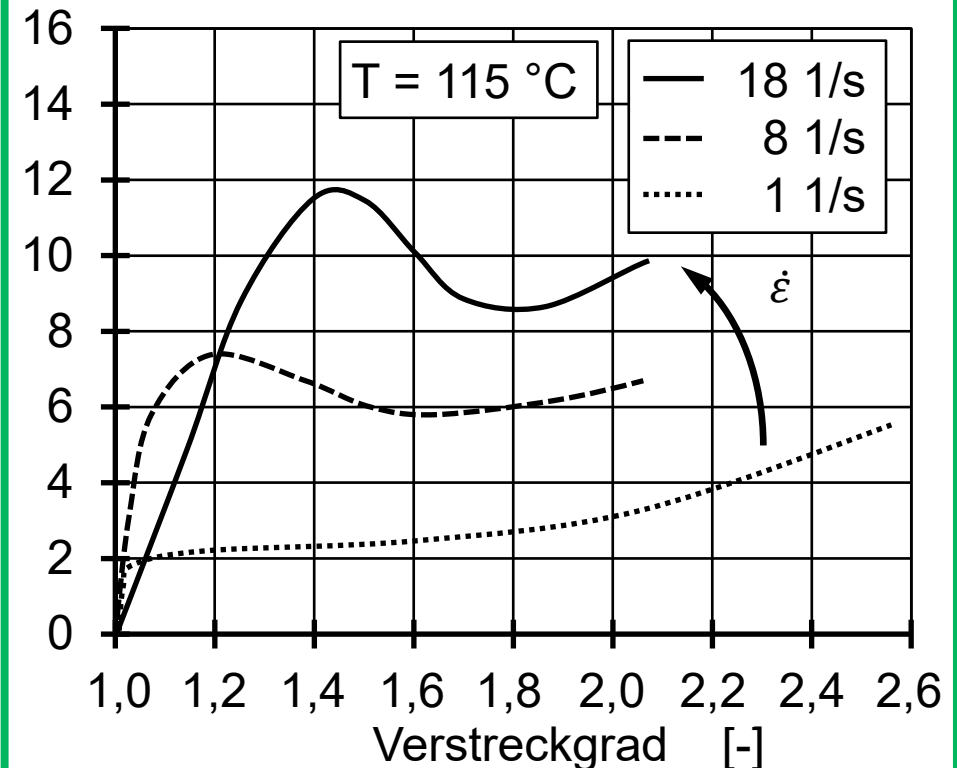
Spannungs-Verstreckgrad-Diagramme von PS

Materialcharakterisierung von Polystyrol durch Reckrahmen

Einfluss der Folientemperatur



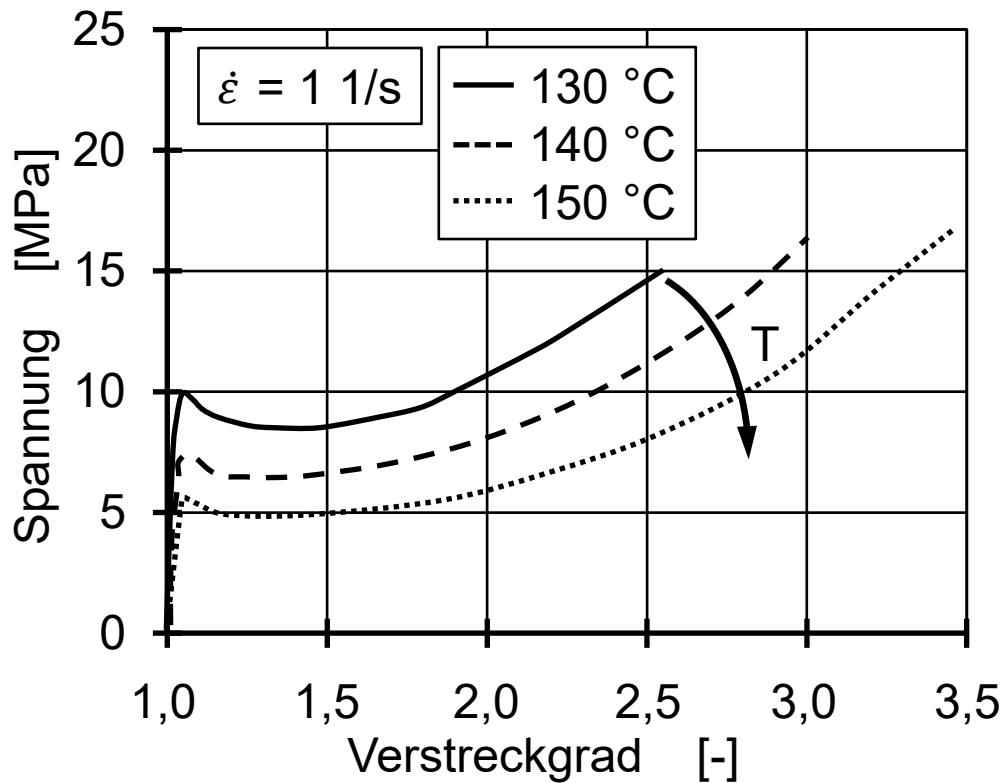
Einfluss der Verstreckgeschwindigkeit



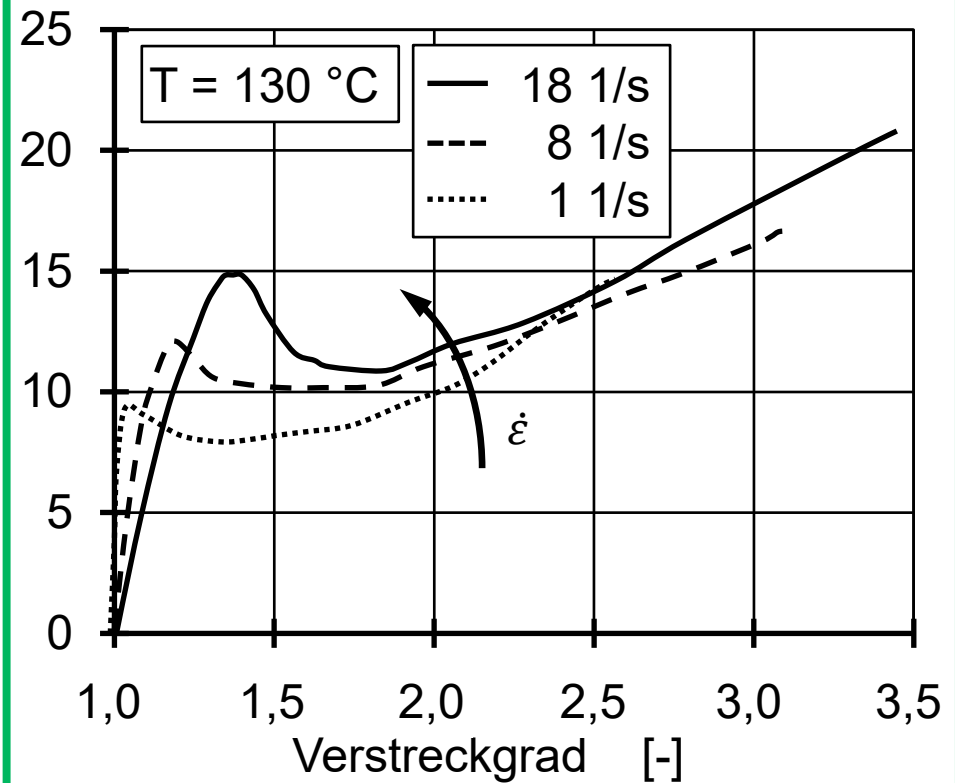
Spannungs-Verstreckgrad-Diagramme von PP

Materialcharakterisierung von Polypropylen durch Reckrahmen

Einfluss der Folientemperatur



Einfluss der Verstreckgeschwindigkeit



Verhalten abbildet [Det01]. Das Yeoh-Modell eignet sich für die Abbildung von gummiähnliche Materialverhalten und somit auch für die im Prozess verwendeten Material PS und PP [NN12, HM17].

Das Yeoh-Materialmodell basiert auf Grundlage des Ansatzes der virtuellen Arbeit. Dazu wird für jedes Element die Formänderungsenergie in Abhängigkeit von seinem Volumen berechnet und somit die Formänderungsenergiedichte ermittelt [NN12]. Auftretende Spannungen können dann durch die Formänderungsenergie ausgedrückt werden. Unter Annahme von Volumenkonstanz gilt für eine äquibiaxiale Deformation:

$$\sigma_B = \frac{1\partial W}{2\partial\lambda_B} \quad (Gl. 7.1)$$

Die Formänderungsenergie W kann durch verschiedene Ansätze in Abhängigkeit der Deformation ermittelt werden. Sie wird sie durch ein Polynom dritten Grades in Abhängigkeit der Invarianten I_1 und der Materialkoeffizienten B_{10} , B_{20} und B_{30} beschrieben [Ede15, Yeo93].

$$W = B_{10}(I_1 - 3) + B_{20}(I_1 - 3)^2 + B_{30}(I_1 - 3)^3 \quad (Gl. 7.2)$$

I_1 kann in Abhängigkeit der Verstreckgrade ermittelt werden:

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \quad (Gl. 7.3)$$

Für eine äquibiaxiale Verstreckung gilt:

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda \quad (Gl. 7.4)$$

Durch die Annahme der Volumenkonstanz folgt:

$$\lambda_3 = \lambda^{-2} \quad (Gl. 7.5)$$

Somit kann I_1 in Abhängigkeit von λ ausgedrückt werden

$$I_1 = 2\lambda^2 + \lambda^{-4} \quad (Gl. 7.6)$$

Da das Modell durch ein Polynom 3. Ordnung beschrieben wird, besitzt die Funktion einen Wendepunkt und eignet sich somit zur Darstellung des Materialverhaltens von Materialien mit Dehnverfestigung [Ede15, Har97]. Das Materialmodell gibt das mechanische Verhalten für eine definierte Temperatur und Dehngeschwindigkeit wieder. Abaqus bietet jedoch die Möglichkeit, die Modellkoeffizienten für unterschiedliche Temperaturen anzugeben und kann bei anderen Temperaturen inter- bzw. extrapolieren. Die berechneten Fittingwerte B_{10} , B_{20} und B_{30} sind in Tabelle 7.2 zu finden. Da das Modell ebenfalls

verstreckgeschwindigkeitsabhängig ist, werden die jeweiligen Koeffizienten bei verschiedenen Temperaturen sowie Verstreckgeschwindigkeiten ermittelt (Tabelle 16.1 - Tabelle 16.3) ermittelt.

Fittingwerte für T =	B_{10}	B_{20}	B_{30}
100	14725382,13	-25781766,65	56619807,61
115	783961,01	-53035,85	8876,86
130	139448,03	-2531,43	514,92

Tabelle 16.1: Berechnete Koeffizienten des Yeoh-Modells für die Verstreckgeschwindigkeit von 1/s (PS)

Fittingwerte für T =	B_{10}	B_{20}	B_{30}
100	10522205,48	-3657250,43	1768482,52
115	2319819,12	-312213,22	60600,07
130	292693,97	-6115,80	728,86

Tabelle 16.2: Berechnete Koeffizienten des Yeoh-Modells für die Verstreckgeschwindigkeit von 8/s (PS)

Fittingwerte für T =	B_{10}	B_{20}	B_{30}
100	0,00	0,00	0,00
115	2575048,58	-180106,73	24259,37
130	375215,57	-7545,10	315,79

Tabelle 16.3: Berechnete Koeffizienten des Yeoh-Modells für die Verstreckgeschwindigkeit von 18/s (PS)

18.3 Veröffentlichungen

HOPMANN, CH.; BALCEROWIAK, D.; FACKLAM, M.: Steuerung von Wanddickenverteilungen thermogeformter Becherformteile durch Einsatz einer lokalen Kühlung mittel Kühlstempel. *Extrusion 26* (2020) 8, S. 32 – 37

HOPMANN, CH.; BALCEROWIAK, D.; FACKLAM, M.: Einen kühlen Kopf bewahren - Kühlstempel ermöglichen eine lokale Anpassung der Wanddickenverteilung im Thermoformen. *Kunststoffe 10* (2021) 111, S. 128 - 131 (Abschlussveröffentlichung ist zum Zeitpunkt des Verfassens des Berichts noch nicht erschienen)

18.4 Kurzzusammenfassungen der durchgeführten studentischen Arbeiten

PAPALLA, M.: *Aufbau einer Simulation zur Berechnung und Analyse der resultierenden Wanddickenverteilung thermogeformter Becherformteile durch eine Temperaturprofilierung mittels Kühlstempel* Institut für Kunststoffverarbeitung, RWTH Aachen, unveröffentlichte Bachelorarbeit, 2021 – Betreuer: D. Balcerowiak

Zusammenfassung:

Die Herstellungskosten von thermogeformten Produkten bestehen bis zu 90 % aus dem für den Prozess verwendeten Material. Prozessbedingt entsteht bei der Bauteilherstellung eine inhomogene Materialverteilung. Die für den Prozess verwendete Halbzeugdicke richtet sich zumeist nach den Dünnstellen des geformten Bauteils, da diese gegen funktionelles Versagen dimensioniert werden müssen. Durch eine Temperaturprofilierung des auszuformenden Halbzeugs kann die Umformphase und somit die Wanddickenverteilung beeinflusst werden.

Mit Hilfe des Aufbaus einer Thermoformsimulation und ihrer Einbindung in eine Simulationsroutine werden diverse Kühlstempelgeometrien und Prozesspunkte zur Beeinflussung der Wanddickenverteilung im Thermoformprozess untersucht. Dazu wird die Simulation anhand der Ergebnisse des experimentellen Einsatzes eines Kühlversuches validiert. Der Fokus der Arbeit liegt auf einer vorhersagbaren Beeinflussung des modifizierten Thermoformprozesses und einer dadurch gezielten Kühlstempelauslegung durch die Analyse diverser Simulationsergebnisse.

Um die Simulationsgenauigkeit zu erhöhen wird durch Laborversuche ein auf das verwendete Halbzeug zugeschnittenes Materialmodell erstellt und die Ermittlung der Wärmeübertragung der Temperaturprofilierung durch einen Reverse-Engineering-Ansatz verbessert.

Es wird bestätigt, dass die Temperaturprofilierung mittels Kühlstempel einen bedeutsamen Einfluss auf die Wanddickenverteilung des Bauteils hat. Die Abhängigkeiten der Ergebnisse von den Prozessparametern werden untersucht und auftretenden Phänomenen des Temperaturprofils und der Wanddickenverteilungen zugeordnet. Bei einer Verwendung eines 35 mm breiten, zylindrischen Kühlstempels kann die Wanddicke der Dünnstelle eines thermogeformten Bechers in der genutzten Simulation um bis zu 53 % zunehmen.

GILLMEISTER, T.: *Konstruktion und Inbetriebnahme eines Kühlstempels zur lokalen Folientemperatur bei der Herstellung von Schalenformteilen im Thermoformen* Institut für Kunststoffverarbeitung, RWTH Aachen, unveröffentlichtes Forschungslabor, 2021 – Betreuer: D. Balcerowiak

Zusammenfassung:

Beim Thermoformprozess werden aus flächigen thermoplastischen Halbzeugen dreidimensionale Bauteile hergestellt. Dabei wird eine bis in den kautschukelastischen Zustand erhitzte Folie mit Druckluft zu einem Formteil ausgeformt. Vor dem Ausformen mit Druckluft kann durch mechanisches oder pneumatisches Vorverstrecken oder durch eine gezielte Temperaturprofilierung Einfluss auf die Verstreckwiderstände des erhitzten Halbzeugs genommen werden. Der Prozessschritt vor dem Ausformen hat maßgeblichen Einfluss auf die charakteristische Wanddickenverteilung thermogeformter Bauteile.

Thermogeformte Bauteile werden nach der dünnsten Wanddicke ausgelegt, die benötigt wird, damit das Bauteil gerade noch alle mechanischen Anforderungen erfüllt. Dies hat zur Folge, dass alle dickeren Bauteilbereiche überdimensioniert sind. Bei vielen Bauteilen wird deshalb eine homogenisierte Wanddickenverteilung angestrebt. Eine Homogenisierung der Wanddicke führt zu einer geringeren Materialmenge, die pro Bauteil benötigt wird. Da thermogeformte Bauteile oft in großen Mengen (z.B. Verpackungsmaterial) produziert werden, ist eine materialeffiziente Produktion zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit zwingend erforderlich.

Um den Einfluss der lokalen Folientemperierung auf die Wanddicke von Schalenbauteilen zu untersuchen, wird ein Kühlstempel konstruiert. Der Konstruktions- und Auslegungsprozess erfolgt nach Konstruktionsrichtlinie VDI 2221. Zur Untersuchung des Einflusses werden Versuchen mit unterschiedlicher Kühlgeometrie, Kühltemperatur und Kontaktzeit durchgeführt.

Die lokale Temperierung der Folie mit einem Kühlstempel beeinflusst die Wanddickenverteilung. Die verschiedenen Kühlgeometrien erzeugen unterschiedliche Wanddickenverläufe, die sich in der lokalen Ausprägung jedoch nur geringfügig unterscheiden. Sowohl das Anpassen der Kühltemperatur, der Kontaktzeit als auch der Kühlgeometrie liefern keinen ausgeprägten Änderungen des Wanddickenverlaufs. Eine mögliche Erklärung ist, dass der Foliendurchhang zu groß ist, um eine ausreichende Kontaktfläche zwischen Folie und Kühlgeometrie zu bilden, die die Verstreckwiderstände maßgebend beeinflusst. Prinzipiell lässt sich ein Potenzial dieses Ansatzes zur Wanddickenbeeinflussung erkennen. Um die Wanddickenverteilung und die dazu benötigten Temperaturprofile stärker zu beeinflussen, müssen andere Kühlstempelgeometrien eingesetzt werden. Diese Stempelgeometrien müssen den Foliendurchhang kompensieren, um größerer Temperaturdifferenzen zum Beeinflussen der Verstreckwiderstände zu ermöglichen.