Über die Beschreibung des Bauteilverzugs im Aluminium-Kokillenguss als Folge behinderter Schwindung

N. Wolff, U. Vroomen, A. Bührig-Polaczek

RWTH Aachen, Gießerei-Institut,

sekretariat@gi.rwth-aachen.de

Abstract

Die Abweichung vom Sollmaß im Sinne eines Bauteilverzuges stellt in der Gießerei ein prominentes qualitätsminderndes Phänomen dar. Diese Verzugsproblematik als Folge von behinderter Erstarrungs- und Abkühlungsschwindung ist für praktisch alle Formgussteile relevant, jedoch für den Dauerformguss mit seinen mechanisch steifen und thermisch gut leitenden Formen von besonderer Bedeutung. Als eine der dominierenden Einflussgrößen auf die Ausprägung der Maßabweichungen des Gussteils wurde bereits in früheren Abhandlungen die Temperatur bei Aufhebung des Formzwanges identifiziert, bisher jedoch ohne dabei klare Mechanismen zu beschreiben. In der vorliegenden Arbeit wird an einem speziell konstruierten Kokillengussteil aus AlSi7Mg0,3 die Temperatur bis zu der Aufhebung des Formzwanges (Entformungstemperatur) von nahe Solidus- bis zur Umgebungstemperatur variiert. Die dabei resultierenden Maßabweichungen werden in die Anteile der freien Schwindung sowie der plastischen Formänderung in Folge der behinderten Schwindung zerlegt. Die Zusammenhänge dieser Anteile werden ermittelt und daraus ein phänomenologisches Beschreibungsmodell erarbeitet. Abschließend wird auf Basis dieses Modells die potenzielle Verzugsreduzierung durch die Wahl der Entformungstemperatur bewertet.

1 Einleitung und Grundlagen

Ein prominentes qualitätsminderndes Phänomen in der Gießerei stellt die Abweichung vom Sollmaß im Sinne eines Bauteilverzugs dar. Diese Verzugsproblematik infolge behinderter Erstarrung und Abkühlungsschwindung ist für praktisch alle Formgussteile relevant, hat aber für den Dauerformguss mit seinen mechanisch steifen und thermisch gut leitenden Metallformen eine besondere Bedeutung.

In der Literatur wird das Phänomen als eine thermisch induzierte Schwindung nach Aufhebung des Formzwanges beschrieben, ausgehend von der zu diesem Zeitpunkt durch

die Form aufgeprägten Bauteilgeometrie [1, 2]. Die Formänderung, die durch die Behinderung der thermischen Schwindung noch in der Form verursacht wird, ist nicht näher beschrieben. In der Forschung wird sich diesem Thema hauptsächlich in numerischen Arbeiten zur Verzugsvorhersage und -kompensation genähert [3–5]. In diesen Arbeiten wird häufig festgestellt, dass es Defizite in der Kenntnis der Grundlagen und deren analytischer Beschreibung gibt. Dieses Wissen über die anteiligen Einflüsse von Bauteil, Werkstoff und Prozess auf den Bauteilverzug ist für die Entwicklung präziser numerischer Modelle, insbesondere bei gekoppelten thermisch-mechanischen Ansätzen, unerlässlich. In verwandten grundlegenden Arbeiten, die sich der Thematik annähern, wurde z. B. beim Gusseisen-Sandguss der Einfluss des Formstoffs - und damit auch des Formzwanges - auf die Gussgeometrie untersucht und Zusammenhänge hergestellt [6].

Bei dem dieser Publikation zugrunde liegenden Projekt werden verschiedene Einflussgrößen auf den Gussteilverzug, wie Bauteilgeometrie und Wanddicke, thermischer Haushalt des Prozesses und der Einfluss des Formzwanges, an einem speziell dafür entwickelten Probenkörper untersucht. Dies erlaubt die verschiedenen Mechanismen der Verzugsentstehung separiert zu betrachten und ermöglicht es weiterhin, die Anteile der verschiedenen Einflussgrößen am gesamten Bauteilverzug quantitativ zu vergleichen. Ziel ist es, eine breitere Wissensbasis über die grundlegenden Zusammenhänge zur Optimierung numerischer Modelle für eine präzisere prädiktive Gussteil- und Prozessauslegung zu schaffen und anschließend den Bauteilverzug zu kompensieren. Hierbei wird in einem ersten Schritt der Schwerkraftkokillenguss von Aluminium als Basis für die Betrachtung von Dauerformgussverfahren untersucht.

In dem hier verwendeten Versuchsaufbau wurden bereits die Einflüsse der wärmehaushaltsangepassten Temperierkanalauslegung und verschiedener Vortemperierungen auf den Bauteilverzug betrachtet und publiziert [7, 8]. In diesen Untersuchungen, bei denen das Gussteil bei Raumtemperatur entformt wurde, konnten nur geringe Einflüsse auf die Größe des resultierenden Verzugs festgestellt werden. Im Gegensatz dazu wurde in anderen Untersuchungen, hauptsächlich im Druckguss, die Temperatur zum Zeitpunkt der Entformung als einer der dominierenden Einflussfaktoren auf die Maßabweichungen des Gussteils identifiziert [9]. Daran anknüpfend wird in der hier vorgestellten Arbeit der Einfluss der Entformungstemperatur und damit der Temperaturintervalle, in denen die in der Form behinderte und die freie Schwindung des Gussstücks auftritt, betrachtet und entsprechende Zusammenhänge erarbeitet.

2 Methodik und Experimente

Überlegungen zur einfachen Erfassbarkeit des Bauteilverzugs führten zu einer Geometrie des Probenkörpers als "U", indem der Verzug als einfaches Längenmaß der Öffnungsweite bestimmt werden kann. Zur Erfassung des unbehinderten Schwindens wird der Verbindungssteg des "U" auf einer Seite verlängert, so dass sich ein auf der Seite liegendes "F" als Prüfgeometrie ergibt. Die gewählten Abmessungen sind in Abb. 1 links dargestellt. Das gerahmte Maß von 130 mm ist dasjenige, dessen Abweichung vom Sollwert als Bauteilverzug definiert ist. Mit dieser Geometrie für den Probekörper ergibt sich ein Gussteilgewicht von 2,4 kg Aluminium. Für die Versuche wurde die modulare Versuchskokille aus der früheren Arbeit zum Einfluss des Wärmehaushalts wiederverwendet [7, 8]. Die eigentliche Kokille wurde so gestaltet, dass sie um das Gussteil herum eine konstante Wandstärke aufweist, um einen gleichmäßigen Einfluss der Temperierung auf das Bauteil zu gewährleisten. Um sicherzustellen, dass die Wärme nur in horizontaler Richtung, um den Umfang des Gussteils herum, entzogen wird, sind die Kokillenmodule isolierend zwischen Calciumsilikatplatten angeordnet. Die in dieser Arbeit verwendeten Module ermöglichen durch Verwendung eines Abreißeingusses, integrierten Exzentern und Auswerfern eine Entformung bis zu Gussteiltemperaturen nahe der Solidustemperatur. Die um das Gussteil geöffnete Kokille mit abreißbarem Einguss ist in Abb. 1 rechts dargestellt. Der Ort der Temperaturmessung in der Kokille ist markiert (X), wobei jeweils die untere und obere Calciumsilikatplatte zur besseren Veranschaulichung nicht abgebildet sind.

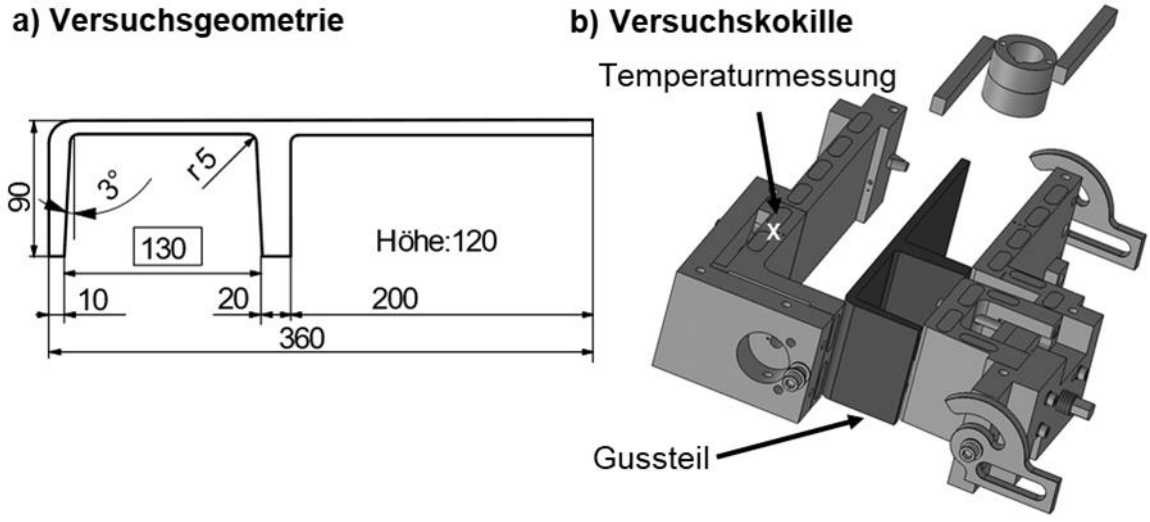


Abb. 1: a) zeigt die Kontur des Gussteiles (in mm); b) zeigt die Kokille zur temperaturvariablen Entformung in geöffnetem Zustand um das Gussteil

2.1 Bestimmung der Zusammenhänge

Das zu erwartende thermomechanische Verhalten des in der als mechanisch starr angenommenen Form erstarrenden und auf Entformungstemperatur abkühlenden Versuchsteils ist in Abb. 2 links dargestellt: 1. kennzeichnet die Bereiche und Richtungen der ungehinderten Schwindung; 2. zeigt den Bereich der durch die Form behinderten Schwindung; 3. zeigt die Bereiche der Kokille, über die aufgrund der Behinderung der Schwindung Kräfte auf das Gussteil einwirken - im Gussteil werden Eigenspannungen erzeugt; 4. zeigt die erwarteten Richtungen der aus der Aufhebung des Formzwangs resultierenden Formänderungen. Ab dem Entformungszeitpunkt, gleichbedeutend mit der Temperatur der Entformung, wird eine gleichmäßige Schwindung des gesamten Gussteils angenommen. Ziel ist es nun, die Formänderung in Abhängigkeit von der Schwindungsbehinderung darzustellen.

Um die Zusammenhänge hierfür zu beschreiben und zu ermitteln, wird die Abweichung der Öffnungsweite des „U“ als Verzugsmaß (V) erfasst. Die Abweichung der inneren Länge - der Verbindung zwischen den Seiten des „U“ - vom Sollwert wird als Maß (Δl_i) für die Schwindungsbehinderung verwendet. Die Differenz zwischen der Öffnungsweite und der inneren Länge wird als Maß für den Formänderungsanteil (Δ_F) herangezogen. Zum Vergleich mit der freien Schwindung wird letztere im Bereich der ungehinderten Kontraktion am freien Ende des Gussteils gemessen. Die Größen und Messpunkte sind in Abb. 2 rechts dargestellt. Zu beachten ist, dass die Messungen als Mittelwert über die Bauteilhöhe vorgenommen wurden und dass die Fertigungsabweichungen der Formmodule und die Entformungsschrägen bei der Ermittlung der Messgrößen berücksichtigt wurden.

Zur Veranschaulichung der zu beschreibenden Zusammenhänge wird hier das zu erwartende Bauteilverhalten für die niedrigste und höchste Entformungstemperatur beschrieben: Bei der Entformung bei Solidustemperatur tritt keinerlei Schwindungsbehinderung auf. Es wird eine gleichmäßige Schwindung angenommen, ohne Formänderungsanteil. Gleichzeitig wird erwartet, dass die innere Länge des „U“ der gleichen prozentualen Schrumpfung unterliegt wie das freie Ende. Bei der Entformung bei Raumtemperatur herrscht in der Region 2 (siehe Abb. 2, links) eine vollständig behinderte Schwindung vor. Nach Aufhebung des Formzwanges werden die dadurch verursachten Eigenspannungen teilweise durch eine Formänderung abgebaut (siehe 4 in Abb. 2 links). Infolgedessen sind eine sehr geringe Abweichung der inneren Länge und ein erheblicher Formänderungsanteil zu erwarten, die zusammen den Gesamtverzug ausmachen.

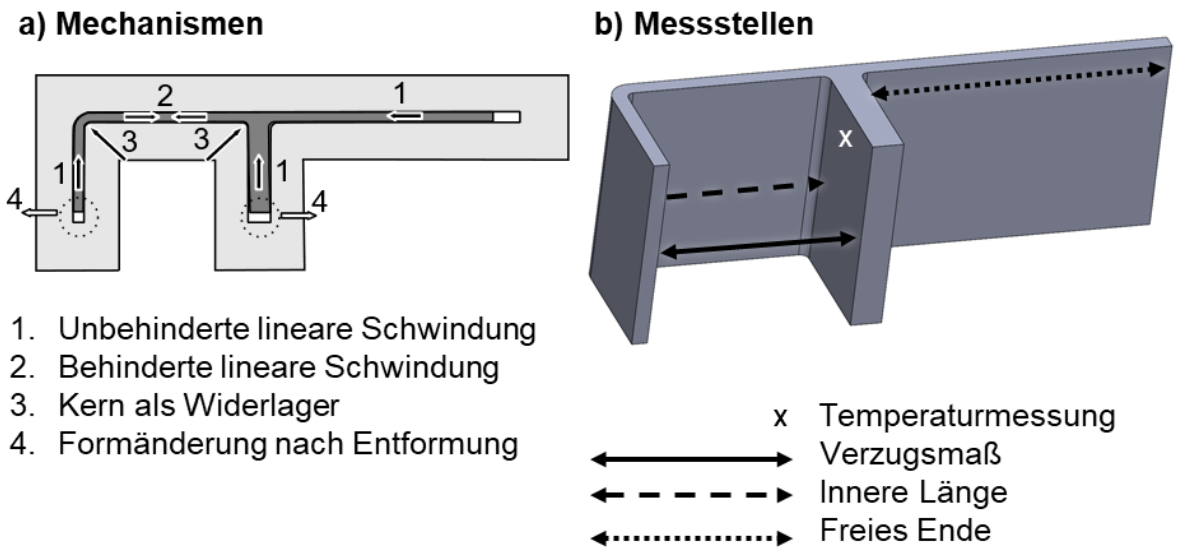


Abb. 2: a) zeigt die relevanten physikalischen Zusammenhänge; b) zeigt das Gussteil und die Messstellen der herangezogenen Größen

2.2 Versuchsdurchführung

Als Ausgangspunkt für die zu betrachtenden Experimente in AlSi7Mg0,3 dienen die, im Rahmen der angeführten Arbeiten zum Einfluss des Wärmehaushalts hergestellten, Gussteile als erste Versuchsreihe. Diese wurden bei unterschiedlichen Kokillentemperaturen von 30, 150 und 300 °C gegossen und jeweils am nächsten Tag bei Raumtemperatur (hier mit 30 °C angenommen) entformt. Es wurden keine Korrelationen zwischen Kokillentemperatur und Verzug festgestellt [8]. Anschließend wurden vier weitere Reihen von je acht Gussstücken gegossen. Die Entformungstemperatur wurde über die Verweilzeit in der Kokille und das Umschalten der Temperierung bis in den Bereich der Solidustemperatur (für AlSi7Mg0,3 liegt diese bei 573 °C) variiert, gemessen im massivsten Bereich des Gussteils. Gemessene Temperaturen im Gussteil und in der Kokille sind in Abb. 3 dargestellt, im Einzelnen wurde bei den vier Versuchsreihen wie folgt vorgegangen:

1. Entformung mit der auf 250 °C temperierten Kokille, wenn die Temperatur im Speiser ca. 550 °C erreicht - Entformungstemperatur im Gussteil etwa 347 °C
2. Entformung mit der auf 250 °C temperierten Kokille 360 Sekunden nach dem Gießen - Entformungstemperatur ca. 285 °C im Gussteil
3. Entformung mit Hilfe des Abrisseingusses (ohne Speiser) 70 s nach dem Gießen mit der auf 250 °C temperierten Kokille - Entformungstemperatur im Gussteil ca. 562 °C
4. Auf 250 °C temperierte Kokille, die 60 Sekunden nach dem Gießen auf 150 °C Vorlauftemperatur umgeschaltet wurde (Zeit mit "O" gekennzeichnet). Entformung 420 Sekunden nach dem Gießen - Entformungstemperatur ca. 190 °C im Gussteil

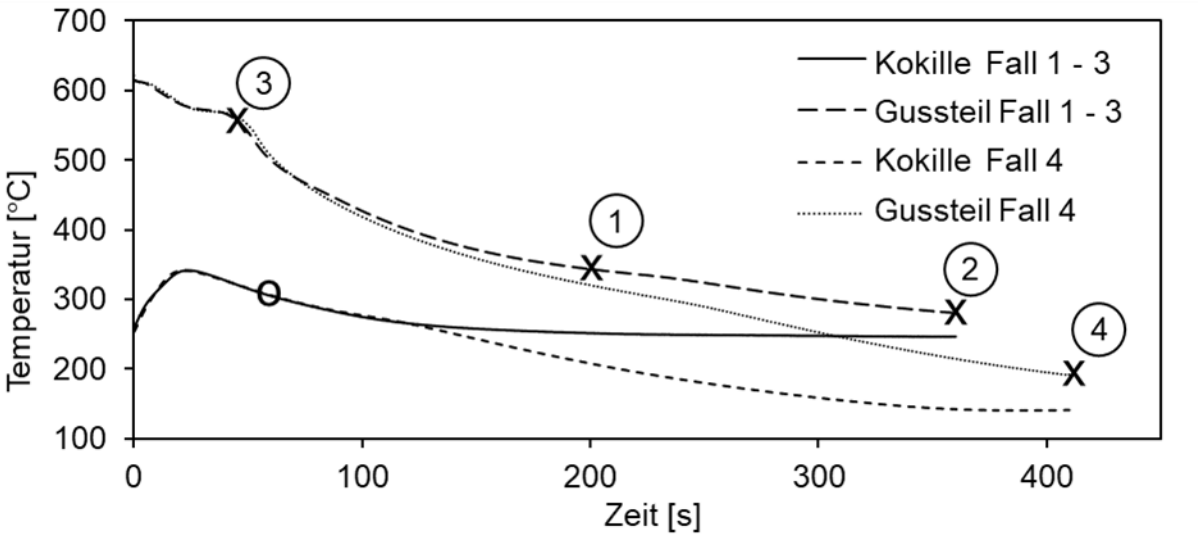


Abb. 3: In-situ erfasste Temperaturen in Kokille und Gussteil bis zu den jeweiligen Entformungszeitpunkten (markiert mit einem „X“)

3 Ergebnisse

Die fünf im Folgenden betrachteten Versuchsreihen lieferten mittlere Entformungstemperaturen von 190, 285, 347, 562 °C und Raumtemperatur (angenommen mit 30 °C). Die Verzugsanalyse der fünf Serien für die temperaturvariable Aufhebung des Formzwanges ergibt folgendes Bild: Die Mittelwerte zeigen einen nahezu linearen Verlauf des Verzugs über die Entformungstemperatur von 0,73 mm bei 30 °C bis -0,74 mm bei 562 °C, wobei bei 285 °C mit -0,06 mm nahezu ein Nulldurchgang erreicht wird. Die Standardabweichungen liegen bei allen Serien in einem ähnlichen Bereich (0,07 bis 0,11 mm). Die gemessene Abweichung der inneren Länge zeigt ebenfalls einen klaren Trend von -0,09 mm bei Raumtemperatur bis -0,33 mm bei 347 °C (und entsprechend eine lineare Schrumpfung von 0,07 bzw. 0,26 %), nur der Wert von -0,32 mm bei 562 °C weicht hiervon ab. Hier ist anzumerken, dass dies innerhalb des Bereichs der ermittelten Standardabweichungen von 0,04 bis 0,06 mm liegt. Für den Formänderungsanteil ist wiederum eine monotone Entwicklung von 0,82 mm bei Raumtemperatur bis -0,42 mm bei 562 °C Verformungstemperatur zu beobachten. Dabei ist zu beachten, dass neben der Veränderung der Öffnungsweite von der Aufweitung (positive Werte) zum Schließen (negative Werte) des "U" die Öffnungsweite bei 347 °C mit 0,11 mm weitgehend konstant ist. Die Schwindung des freien Endes wurde mit -2,28 mm bei einer Standardabweichung von 0,07 mm ermittelt, was einer Schrumpfung von 1,14 % entspricht, die unabhängig von der Entformungstemperatur ist.

3.1 Zerlegung des Verzuges in seine Anteile

Mit dem Ziel des Ausdrucks des Formänderungsanteils als Funktion der behinderten Schwindung und des Verzuges als Funktion der Entformungstemperatur lassen sich so im Folgenden einfache Beziehungen formulieren. Die Abweichung der inneren Länge Δl_i als lineare Funktion der Temperatur der Entformung T_E folgt aus dem Trend der Messwerte als lineare Näherung zu:

$$\Delta l_i(T_E) = -0{,}0818\,mm - 0{,}0005\,mm\,°C^{-1}\,T_E$$

Der Formänderungsanteil Δ_F als Funktion der Abweichung der inneren Länge aus dem Trend der Messwerte folgt als lineare Näherung zu:

$$\Delta_F(\Delta l_i) = 1{,}1883\,mm + 4{,}4\,\Delta l_i$$

Der Verzug V als Funktion der Entformungstemperatur lässt sich so als folgende lineare Funktion annähern:

$$V(T_E) = 0{,}7466\,mm - 0{,}0027\,mm\,°C^{-1}\,T_E$$

Die Messwerte, Trends und der daraus abgeleitete Verzug sind in Abb. 4 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der linear modellierte Verzug als Funktion der Entformungstemperatur näher an den Mittelwerten der Messungen liegt als deren Standardabweichungen (0,07 bis 0,11 mm).

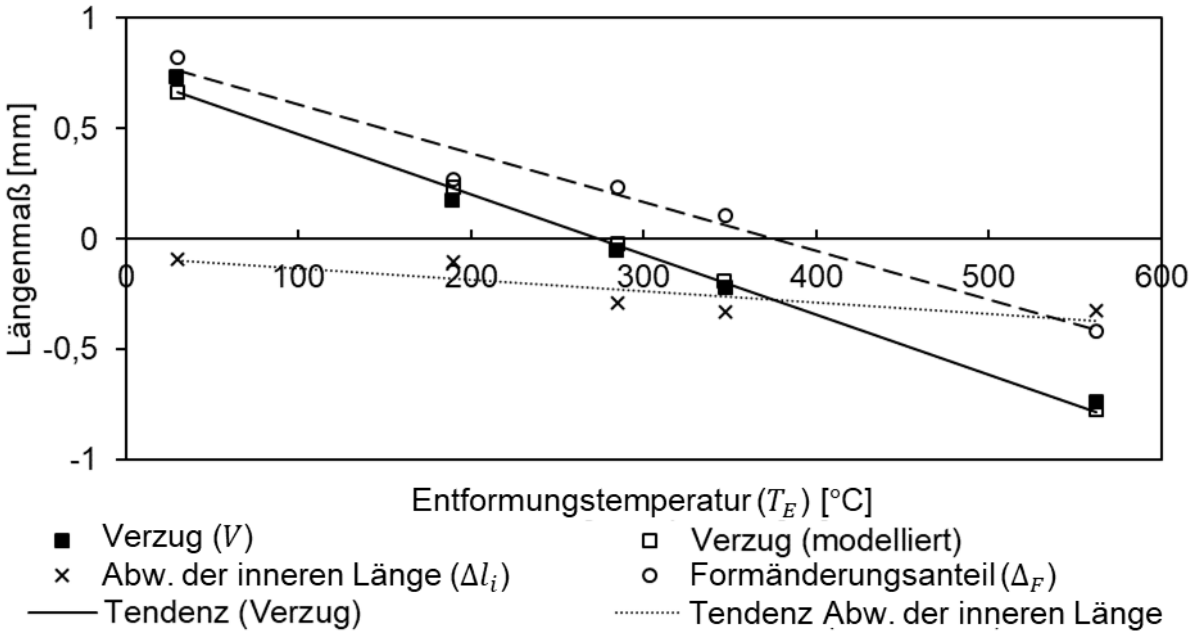


Abb. 4: Gemessene zusammen mit aus den linearen Annäherungen erzeugten Verzugswerte, sowie die Abweichung der inneren Länge und der Formänderungsanteil über die Entformungstemperatur

4 Diskussion

Die Experimente zeigen eine nahezu lineare Abhängigkeit des Verzuges von der Entformungstemperatur. Auch der Fall der Entformung bei Raumtemperatur, nach einem Tag in der Form, passt in diese Beobachtung. Dies zeigt, dass nicht die Dauer des Formzwangs, sondern die Temperatur seiner Aufhebung maßgeblich ist. Die Abweichung der inneren Länge zeigt eine ähnliche Temperaturabhängigkeit, mit leichten Abweichungen hiervon bei den mittleren Entformungstemperaturen. Hier kann von Ungenauigkeiten in der Temperaturzuordnung ausgegangen werden, da die Temperaturmessung in einem anderen Bereich des Bauteils als die Verzugsbildung erfolgte und im Prozess schon kleine Unterschiede zu Abweichungen führen können. Daher kann auch hier eine lineare Abhängigkeit von der Entformungstemperatur angenommen werden, was mit den Aussagen der Literatur übereinstimmt. Ein ähnliches lineares temperaturabhängiges Verhalten zeigt sich folglich auch für den Formänderungsanteil. Betrachtet man diese Abhängigkeiten in Kombination und insbesondere ihre lineare Abhängigkeit von der Temperatur, so kann schlussgefolgert werden, dass für eine als mechanisch starr angenommene Form die plastische Verformung eine direkt proportionale Folge der Schwindungsbehinderung ist.

Infolge der deutlichen proportionalen Abhängigkeiten ergeben die Versuche mit Entformung bei 285 °C Gussteile den geringsten Verzug (-0,06 mm) und für eine Aufhebung des Formzwanges bei 347 °C den geringsten Formänderungsanteil mit 0,11 mm und damit ein nahezu paralleles "U". Dabei ist zu beachten, dass die Werte der Abweichung der inneren Länge für alle Entformungstemperaturen mit 0,09 bis 0,33 mm näher an einer vollständig behinderten als an der freien Schwindung liegen (0,07 bzw. 0,26 % Schrumpfung im Vergleich zu 1,14 %). Auch dies lässt sich durch die Tatsache erklären, dass die Temperatur im massivsten Bereich des Gussteils und nicht im behindert schwindenden gemessen wurde. Dort wird sie wegen der geringeren Wanddicke zeitgleich niedriger sein. Die Verschiebung des Formänderungsanteils beim Entformen bei hohen Temperaturen in den deutlich negativen Bereich widerspricht den Erwartungen. Hier wurde, wie in der Literatur postuliert, erwartet, dass, je höher die Temperatur ist bei der der Formzwang aufgehoben wird, die freie und damit gleichmäßige Schwindung des Bauteils eintritt - ohne Bildung eines Formänderungsanteils. Dies ist ein Hinweis auf weitere für die plastische Verformung verantwortliche Mechanismen, die während oder kurz nach der Erstarrung wirksam werden und es in zukünftigen Arbeiten gezielt zu untersuchen gilt. Die Ergebnisse der Experimente zeigen deutlich, dass über die gezielte Steuerung der Verzug als Resultat der behinderten Schwindung minimiert werden kann.

Danksagung

Die vorgestellten Untersuchungen wurden im Rahmen des Sonderforschungsbereichs SFB1120-236616214 „Bauteilpräzision durch Beherrschung von Schmelze und Erstarrung in Produktionsprozessen“ an der RWTH Aachen durchgeführt und durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft e.V. (DFG) gefördert. Für die Förderung und Unterstützung sei an dieser Stelle gedankt.

Literatur

[1] Campbell, J.: Castings. London: Butterworth-Heinemann, 1991.

[2] Nogowizin. B.: Theorie und Praxis des Druckgusses. Berlin: Fachverlag Schiele & Schoen, 2010. ISBN-13 : 978-3794907960.

[3] Hofer, P.; Kaschnitz, E.; Schumacher, P.: Distortion and Residual Stress in High-Pressure Die Castings: Simulation and Measurements. JOM. 2014, 66.

[4] Hofer, p.; Kaschnitz, E.: Simulation von Verzug und Eigenspannungen in Druckgussteilen. Giesserei-Rundschau. 2008, 55, S. 190 -193.

[5] Garza-Delgado, A.: Study of Casting Distortion and Residual Stresses in Die Casting. [Hrsg.] Ohio State University. Columbus : s.n., 2007.

[6] Galles, D.; Beckermann, C.: Measurement and Simulation of Distortion of a Steel Bracket Casting. 66th SFSA Technical and Operating Conference Proceedings. 2012, Peper no. 5.2.

[7] Wolff, N.; Hohlweck, T.; Vroomen, U.; Bührig-Polaczek, A.; Hopmann, Ch.: Development of an Experimental Setup to Investigate Influences on Component Distortion in Gravity Die Casting and a First Variation of Temperature Control Strategy. Metals. 2021; 11(12):2028. https://doi.org/10.3390/met11122028

[8] Wolff, N.; Hohlweck, T.; Vroomen, U.; Bührig-Polaczek, A.; Hopmann, Ch.: Entwicklung einer Versuchskokille zur Untersuchung und thermischen Beeinflussung des Bauteilverzugs beim Schwerkraftkokillengießen. Gießerei Special, Bd. 1, S. 14–23, 2020.

[9] Egner-Walter, A.: Prediction of distortion in thin-walled die castings. CastiPlant and Technology. 2007, 1, S. 24 - 29.

Autorenanschriften

Nino Wolff

Lehrstuhl für Gießereiwesen und Gießerei-Institut der RWTH Aachen

Intzestraße 5

D-52072 Aachen

Telefon: +49 (0) 241 80 – 94067

Telefax: +49 (0) 241 80 – 92276

E-Mail: n.wolff@gi.rwth-aachen.de

Dr.-Ing. Uwe Vroomen

Lehrstuhl für Gießereiwesen und Gießerei-Institut der RWTH Aachen

Intzestraße 5

D-52072 Aachen

Telefon: +49 (0) 241 80 – 95892

Telefax: +49 (0) 241 80 – 92276

E-Mail: u.vroomen@gi.rwth-aachen.de

Univ. Prof. Dr.-Ing. Andreas Bührig-Polaczek

Lehrstuhl für Gießereiwesen und Gießerei-Institut der RWTH Aachen

Intzestraße 5

D-52072 Aachen

Telefon: +49 (0) 241 80 – 95880

Telefax: +49 (0) 241 80 – 92276

E-Mail: sekretariat@gi.rwth-aachen.de