

Einfluss der Kokillentemperierung auf die Erstarrung beim Dauerformgießprozess

Das Durchströmen mit Öl, Wasser oder Luft stellt den Stand der Technik dar, um beim Dauerformgießen eine gezielte Temperierung bestimmter Kokillenbereiche zu erreichen. Ziel dabei ist es, entweder bestimmte Temperaturgradienten zu erzeugen, die zu einer besseren Gussqualität führen oder kritische Hotspots zu kühlen, um Zykluszeiten zu verkürzen oder die Standzeit des Werkzeugs zu erhöhen. Um die Auswirkungen einer Temperierung näher zu untersuchen, wird ein Versuchsaufbau mit Messinstrumentierung zur Erfassung der Temperaturen innerhalb von Schmelze und Form genutzt. Zusätzlich wird eine thermomechanische Simulation der Erstarrung durchgeführt, die Informationen über den thermischen Haushalt bietet, die über die lokal gemessenen Daten hinausgehen. Dieser Ansatz ermöglicht sowohl eine umfassende Bewertung der thermischen Bedingungen innerhalb von Guss, Form und Kern als auch eine Beschreibung des Verhaltens eines größeren Schmelzevolumens und des jeweiligen Temperierungseinflusses für die Fälle einer einseitigen Kühlung sowie einer beidseitigen Kühlung eines kleineren Schmelzevolumens.

Thomas Vossel, Nino Wolff, Björn Pustal und Andreas Bührig-Polaczek, Aachen

1 Einleitung

Der Gießprozess stellt eine komplexe Interaktion diverser physikalischer Abläufe dar, auf den der Gießer im Wesentlichen über zwei Faktoren Einfluss nehmen kann. Auf der einen Seite besteht die Möglichkeit der metallurgischen Behandlung. Je nach eingesetzter Legierung gibt es dabei unterschiedliche Möglichkeiten, die Gießeigenschaften in Richtung eines fehlerfreien Gussteils zu beeinflussen. Für den Fall des in dieser Arbeit betrachteten AlSi-Legierungstyps sind Kornfeinung und Veredelung als typische Schmelzebehandlungen zu nennen. Neben einer Verbesserung der mechanischen Eigenschaften des Werkstoffs, führt eine erfolgreiche Kornfeinung des primären α -Mischkristalls sowie eine Veredelung des eutektischen Siliziums auch zu verbesserten Gießeigenschaften [1-4]. Auf der anderen Seite bestimmen neben der Wahl des Gießprozesses an sich die zugehörigen Prozessparameter das Ergebnis des Abgusses. Insbesondere haben die thermischen Parameter Einfluss auf Gussqualität und Standzeit der Werkzeuge [5]. Neben der prozessoptimierten Auslegung des Gießsystems ist im Dauerformguss eine Temperierung der Kokillen üblich. Sie kommt sowohl zum Beheizen bestimmter Bereiche einer Gussform zum Einsatz als auch zur Kühlung der Form, um kürzere Taktzeiten in der Produktion zu erreichen. Die Kokillentemperierung führt damit zu einem

Eingriff in den thermischen Haushalt des Gießprozesses. In dieser Arbeit werden die Auswirkungen der Kokillentemperierung für den Schwerkraftkokillenguss einer A356-Legierung (Al-Si7Mg0,3) untersucht. Die sich ergebenden Unterschiede bei einer Variation der Kokillentemperierung sollen dazu ermittelt und ausgewertet werden.

Die Einflüsse einer veränderten Abkühlrate auf das Gefüge einer A356-Legierung sowie der Abkühlrate auf Kornfeinung und Veredelung [6] wurden bereits hinreichend dokumentiert. Forschungsbedarf bestand hingegen noch bei den prozessseitigen Einflüssen und Auswirkungen, die hier eingehend untersucht wurden. Eine thermische Analyse der Abkühlkurven wird durchgeführt, um die Beeinflussung der charakteristischen Temperaturen während der Erstarrung zu untersuchen [4, 7, 8]. So lassen sich die auf andere Gussteile und Prozesse übertragbaren Einflussmöglichkeiten und charakteristischen Effekte herausstellen. Es wird sowohl ein experimenteller Aufbau genutzt, an dem eine physikalische Messwertaufnahme stattfindet als auch eine thermomechanische Prozesssimulation mit der Software Abaqus durchgeführt, um Rückschlüsse ziehen zu können, die über die begrenzte Lokalität der Messungen und mangelnde Messmöglichkeiten der experimentellen Daten hinausgehen.

2 Methodik

Der zur Untersuchung des Einflusses der Kokillentemperierung auf den Gießprozess gewählte experimentelle Aufbau ist schematisch in **Bild 1** dargestellt [9]. Hierbei wird der „Napf“ – ein zylindrisches, rotationssymmetrisches Bauteil – abgegossen, das auf einen Innenkern aufschumpft. Eingesetzt wird die Aluminiumlegierung A356 im korngefeinten und veredelten Zustand. Während der äußere Aufbau und der Innenkern aus Stahl gefertigt sind, besteht die unmittelbare Außenwand der Kavität selbst aus Kupfer, das über Kühlkanäle mit Öl temperiert wird. Der Eingussspeiser wird schließlich über einen Sandkern realisiert, sodass der Wärmeentzug durch die Rotationssymmetrie quasi eindimensional nach außen an die temperierte Kokille bzw. nach innen an den Kern erfolgt. Von der installierten Messtechnik werden drei Größen aufgenommen (**Bild 2a**). Die von Typ-K-Thermoelemente in den Kokillenwänden und kokillenwandnah in der Schmelze (**Bild 2b**) gemessenen Tempera-

turverläufe werden in der Auswertung näher betrachtet. Die Ergebnisse der beiden weiteren Messeinrichtungen zur Erfassung der lokalen Bewegung des jeweiligen Materials und zur Kontaktdruckmessung am Innenkern sowie deren Interpretation sind nicht Teil der vorliegenden Arbeit.

2.1 Experimentelle Untersuchungen

Zur Durchführung der Experimente wurden nach dem Anbringen der für die Messungen nötigen Thermoelemente und Quarzstäbe die Formwände mit einer keramischen Gießereischicht besprüht. Im Anschluss wurden die Kühlkanäle der Kupfereinsätze mit Öl befüllt und über Heißkühlaggregate temperiert. Die Auslegung der Kühlkanäle (**Bild 3a**) wurde zuvor mit der Gießereisoftware Magmasoft berechnet, die die Auswirkung einer Temperierung auf den Kupfereinsatz unter Annahme einer konstanten Temperatur auf den Flächen der Kühlkanäle simuliert. Das über die Temperierung erzeugte Tempe-

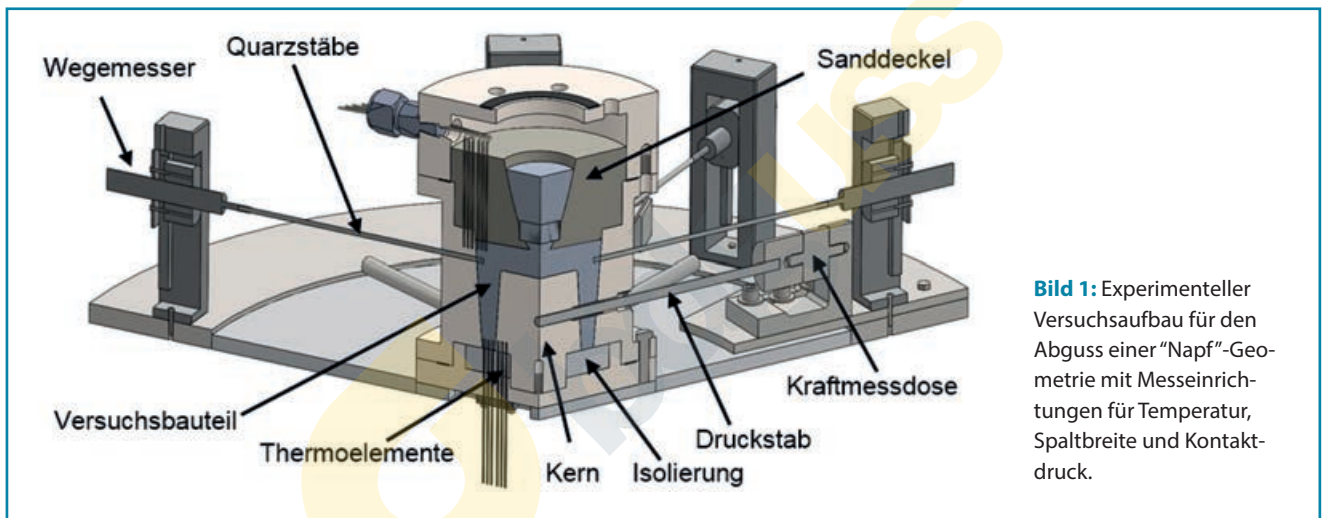


Bild 1: Experimenteller Versuchsaufbau für den Abguss einer „Napf“-Geometrie mit Messeinrichtungen für Temperatur, Spaltbreite und Kontaktdruck.

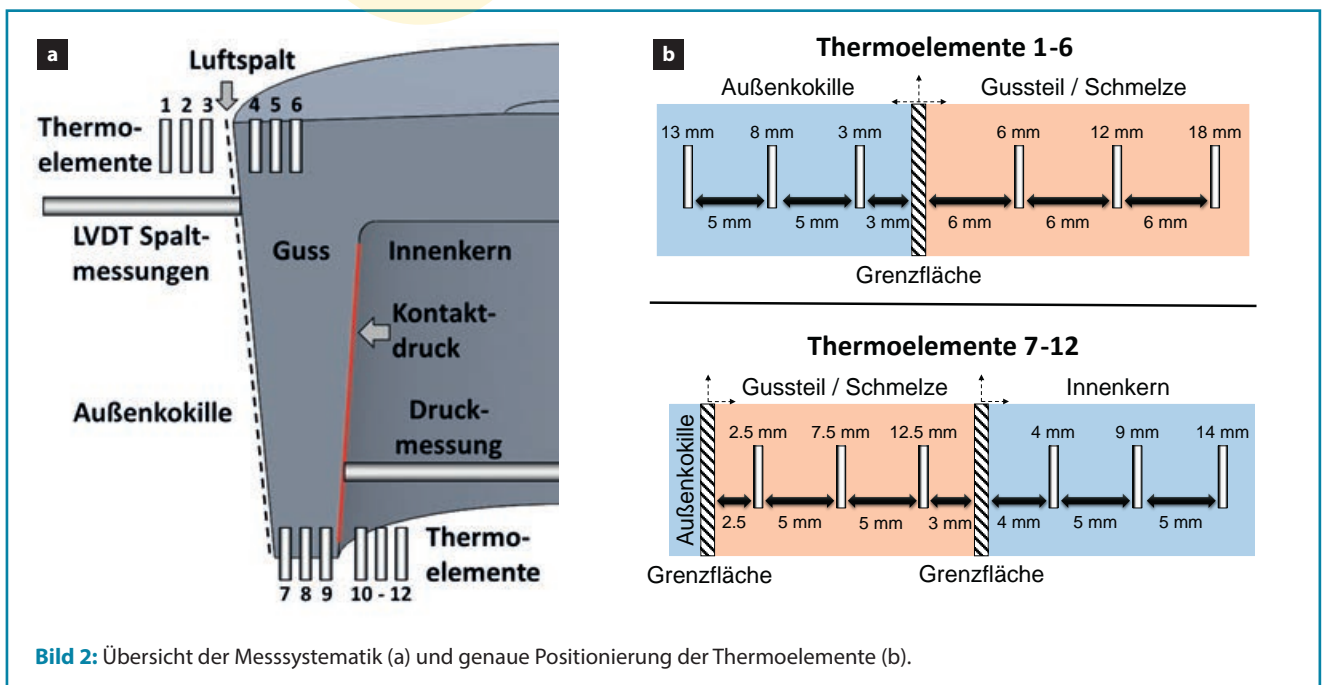


Bild 2: Übersicht der Messsystematik (a) und genaue Positionierung der Thermoelemente (b).

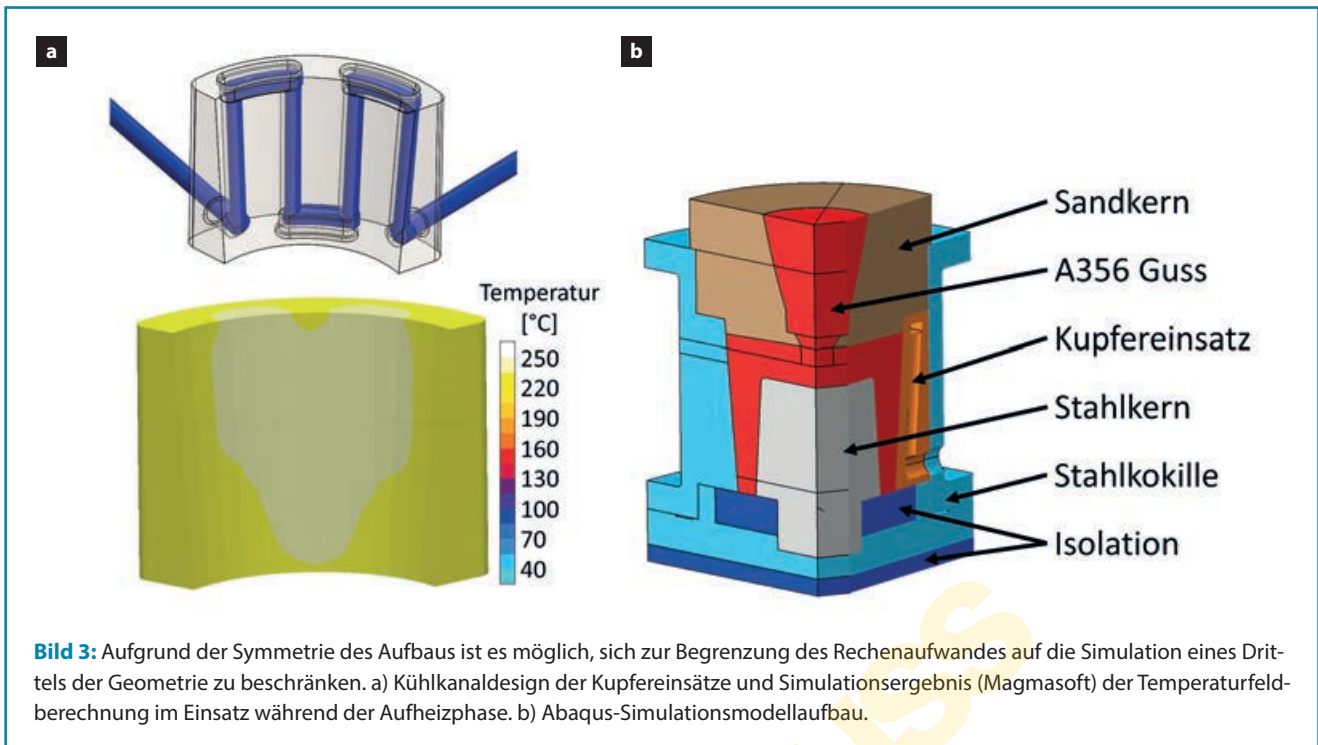


Bild 3: Aufgrund der Symmetrie des Aufbaus ist es möglich, sich zur Begrenzung des Rechenaufwandes auf die Simulation eines Drittels der Geometrie zu beschränken. a) Kühlkanaldesign der Kupfereinsätze und Simulationsergebnis (Magmasoft) der Temperaturfeldberechnung im Einsatz während der Aufheizphase. b) Abaqus-Simulationsmodell Aufbau.

raturfeld zeigt eine weitgehend homogene Ausprägung mit geringfügigen Hotspots entlang der Geometrie der Kühlkanäle. Zur Untersuchung des Einflusses der Temperierung wurden Temperaturen von 30 °C, 100 °C, 200 °C und 300 °C gewählt, wobei jeder Einsatz über einen eigenen Kreislauf temperiert wird. Damit liegt eine Einstellung (30 °C) bei quasi Raumtemperatur vor, während die obere Grenze des Temperierungsbereichs (300 °C) durch das Kühlmedium vorgegeben wird, da dieses bei 350 °C verdampft und Gasschläge durch spontane Verdampfung hervorrufen könnte. Zur Temperaturaufzeichnung wurden stets alle 12 in Bild 2 dargestellten Positionen mit Thermoelementen bestückt. Die LVDT-Messungen (Linear Variable Differential-Transformator) der Bewegung des Gussteils und der Kokillen fand an drei Positionen kreisförmig um den Aufbau statt. Die Druckmessung erfolgte an einer Position. **Bild 4** zeigt den Versuchsstand mit der angeschlossenen Messmimik für Druck und Verzug. Der Abguss in den Aufbau mit aufgesetztem, als Eingusssspeiser fungierendem Sandkern ist in **Bild 5** dargestellt.

2.2 Simulationen

Die Geometrien des Aufbaus wurden in die Software Abaqus implementiert, um eine Erstarrungssimulation durchzuführen. Aufgrund der Symmetrien genügte es, ein Drittel der Geometrie zu nutzen (vgl. Bild 3b), um Rechenkapazitäten einzusparen. Hierbei wurde das Simulationsmodell im Sinne einer thermomechanischen Berechnung aufgebaut und vernetzt. Dies ermöglicht es, die während der Erstarrung auftretenden thermomechanischen Spannungen und Verformungen zu berücksichtigen, um so lokale Informationen über Parameter wie Spaltbreiten und Kontaktdrücke zu erhalten. Für den Phasenwechsel der flüssigen Schmelze in den festen Zustand wird ein Algorithmus für die Freisetzung der latenten Wärme als Folge der Phasenumwandlung in der Abaqus-HETVAL-Routine inte-

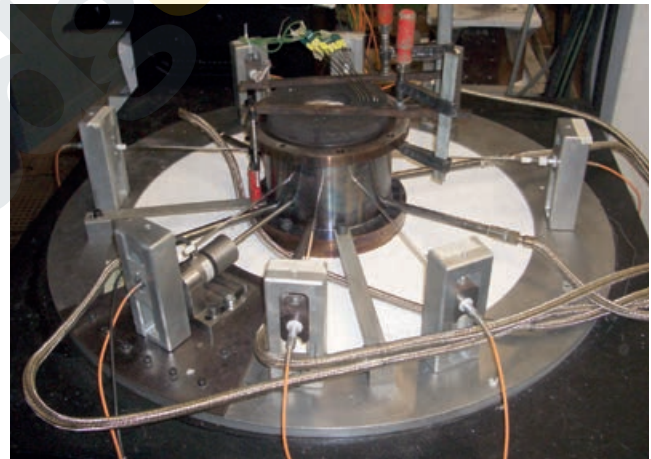


Bild 4: Aufbau des Versuchsstands mit angeschlossener Öltemperierung und Messmimik für Temperatur, Druck und Verzug.

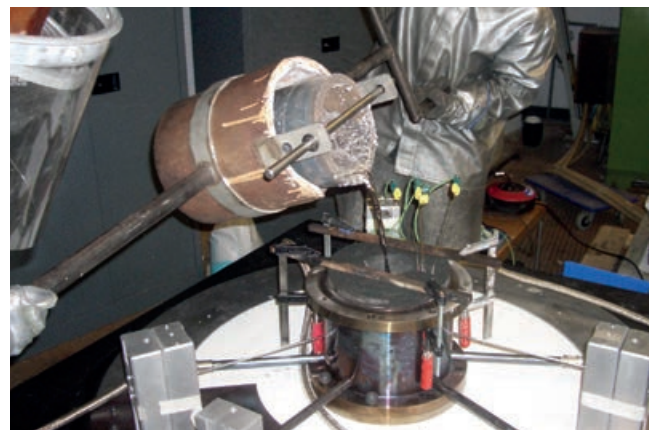
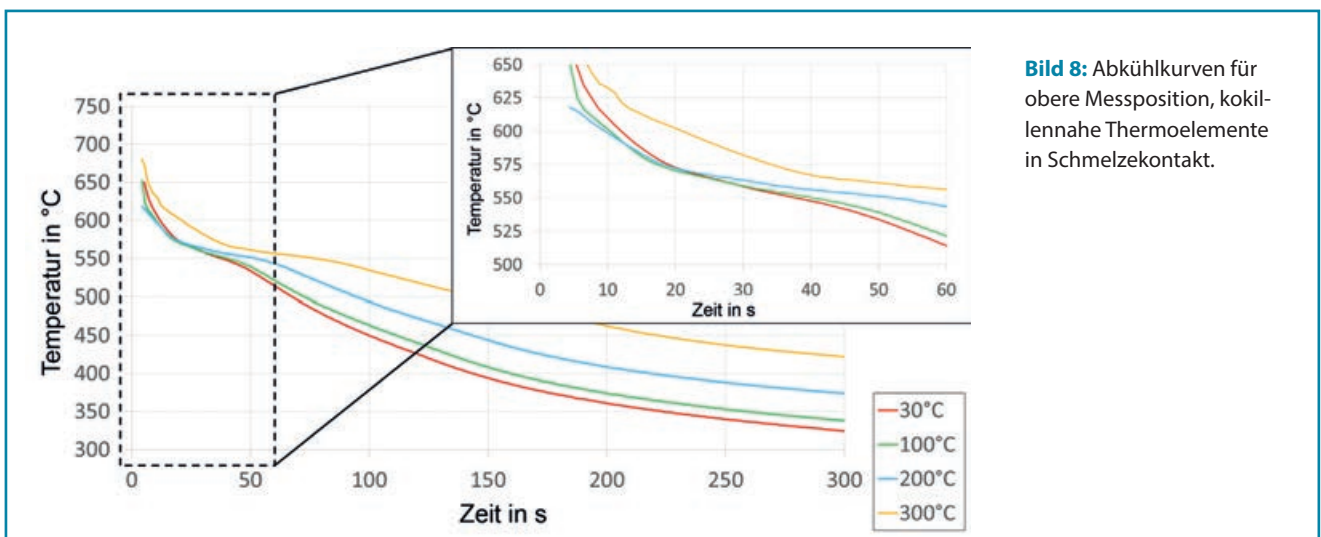
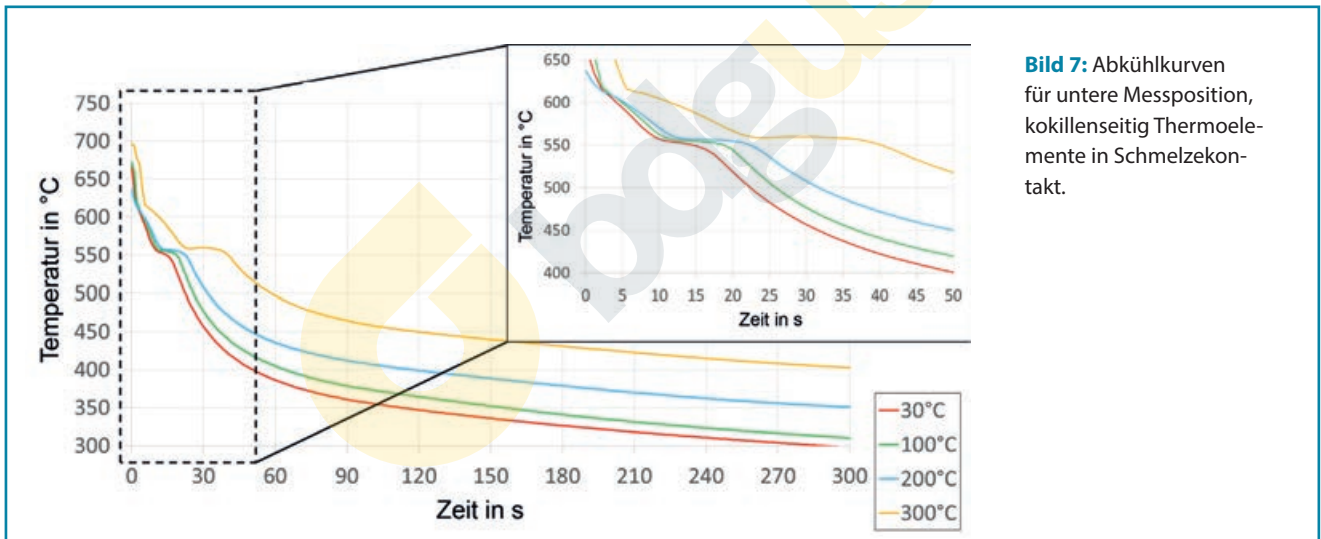
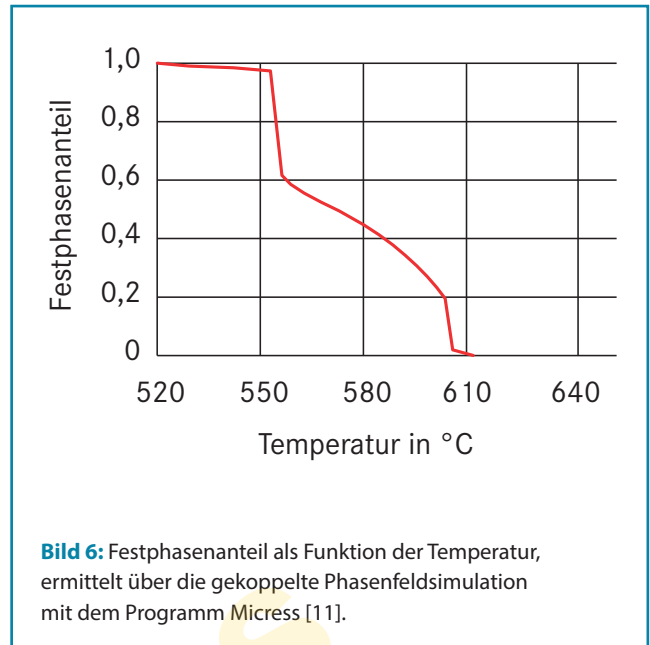


Bild 5: Abguss in den als Eingusssspeiser dienenden Sanddeckel.

griert. Basis hierfür bildet ein temperaturabhängiger Verlauf des Festphasenanteils, der sich aus einer dreidimensionalen, thermodynamisch gekoppelten Phasenfeldsimulation der Mikrostrukturentwicklung unter thermischen Randbedingungen, wie sie im Experiment vorliegen, ergibt [10]. Hierbei werden die Erstarrungsvorgänge einer A356-Legierung beginnend mit einer heterogenen Keimbildung und folgend der primären wie auch eutektischen Erstarrung abgebildet, sodass diesen Vorgängen bei Anwendung des temperaturabhängigen Festphasenanteilsdatensatzes Rechnung getragen wird [11]. **Bild 6** zeigt den verwendeten Verlauf des Festphasenanteils.

3 Ergebnisse

Zur Beschreibung des Einflusses der verschiedenen Kokillentemperierungen auf den Gießprozess werden zunächst die experimentellen, von den Thermoelementen aufgezeichneten Temperaturmessungen in der Schmelze bzw. im Gussteil betrachtet. Hierzu sind in **Bild 7** und **Bild 8** die Abkühlkurven für die untere und obere Messposition aufgetragen, wobei sich die Diskussion zunächst auf die Betrachtung des jeweiligen Ele-



ments beschränkt, das sich in der Schmelze und nahe der Außenkokille befindet (Elemente 4 und 7 aus Bild 2). Die dargestellten Daten wurden so gewählt, dass sie erst ab dem Zeitpunkt genutzt werden, zu dem das jeweilige Thermoelement seine maximal gemessene Temperatur in Folge von Schmelzekontakt erreicht hat. Dieses Vorgehen berücksichtigt die Trägheit der Thermoelemente, die während der ersten Messungen eines Temperaturanstieges noch keine verlässlichen Daten liefern. Erst nachdem sie das Temperaturniveau der umgebenden Schmelze erreicht und sich dementsprechend eingeschwungen haben, liefern sie belastbare Werte.

3.1 Temperaturentwicklung in der Schmelze

Die beiden betrachteten Messpositionen unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Abkühlbedingungen, was sich in den dargestellten Graphen widerspiegelt. Grundsätzlich bedingt die rotationssymmetrische Geometrie des experimentellen Aufbaus einen quasi 1-dimensionalen, radialen Wärmefluss von der Schmelze entweder nach außen an die Kokille oder nach innen an den Kern. Die untere Messposition befindet sich in einem dünnwandigeren Bereich, bei dem Wärme beidseitig über die außen liegende Kupferkokille und den innen liegenden Stahlkern abgeführt wird. Dies führt zu vergleichsweise hohen Abkühlraten in dieser Region. Die obere Messposition zeichnet sich ebenfalls durch eine direkte Wärmeabfuhr über die äußere Kupferkokille aus, liegt jedoch am Rande einer Masseansammlung im Gussteil, weshalb dieser Geometriebereich über ein größeres Schmelzevolumen verfügt und auch nicht direkt Wärme an einen gegenüberliegenden Kern abgibt. Dies erklärt die im Vergleich geringeren Abkühlraten.

Der Unterschied in den Abkühlraten ist beim Vergleich der Graphen in Bild 7 und Bild 8 deutlich sichtbar, da an der unteren Messposition viel schneller geringe Temperaturen erreicht werden. Das Gleiche gilt für die Erstarrungszeiten, die an unterer Position, je nach Kokillentemperierung zwischen ca. 15 s und 35 s liegen, während sich die Spanne für die obere Position auf ca. 40 s bis 70 s erhöht. Hinsichtlich des Erstarrungsvorgangs lassen sich weiterhin die Merkmale einer eutektischen Erstarrung, bestehend aus primärer und eutektischer Erstarrung, grundsätzlich erkennen. Gerade an der unteren Messposition und den dort vorliegenden höheren Abkühlraten gestaltet sich

die exakte Auswertung der Primärerstarrung jedoch häufig als schwierig, da die von der Messmimik aufgenommenen Temperaturdaten jeweils dem in 1,1 s-Taktung gespeicherten Mittel entsprechen, um dem vorliegenden Messrauschen entgegenzuwirken. Damit lassen sich geringfügige Änderungen im Abkühlverhalten während der Primärerstarrung nicht mit hoher Genauigkeit auflösen und infolgedessen werden Temperaturangaben der thermischen Analyse hinsichtlich der Liquidustemperatur nur als ganze Zahlen angeführt. Die eutektische Erstarrung hingegen ist für alle Messungen deutlich zu erkennen, auch wenn nur in wenigen Fällen ein stabiles Plateau erreicht wird oder klar erkennbare Minima/Maxima im Temperaturverlauf vorliegen. Es lässt sich herausstellen, dass die Messung bei einer Kokillentemperierung von 300 °C die markanten Punkte einer eutektischen Erstarrung, gerade für die Messung in der unten gelegenen Region, besonders gut erkennen lassen. Bei allen anderen Temperierungen lassen sich die charakteristischen Bereiche der eutektischen Erstarrung zwar erkennen, allerdings ohne markante Extrempunkte aufzuweisen. Die Abkühlung wird durch die Erstarrungseffekte lediglich verlangsamt, zumeist ohne erkennbare Rekaleszenzen. Nichtsdestotrotz lassen sich die die Erstarrung definierenden Eckdaten durch die Durchführung einer thermischen Analyse ermitteln.

Hierzu werden zunächst die charakteristischen Temperaturen der Liquidustemperatur T_{liq} , die eutektische Temperatur T_{eut} und die Temperatur des Erstarrungsendes T_{Ende} ermittelt und diskutiert. Als Vergleich dient hierbei eine Calphad-Rechnung für eine AlSi7Mg0,3-Legierung mit dem Programm ThermoCalc (unter Nutzung der TTAL8-Datenbank) zur Bestimmung der Gleichgewichtstemperaturen, die sich zu $T_{liq} = 615,38 \text{ °C}$ und $T_{eut} = 574,75 \text{ °C}$ ergeben. Die ermittelten Liquidustemperaturen für die jeweilige Messposition und Kokillentemperierung sind in Bild 9 dargestellt. Anhand der dargestellten Linie für die Liquidustemperatur gemäß thermodynamischem Gleichgewicht lässt sich auch die jeweilige Unterkühlung abschätzen. Zunächst werden die Daten der Liquidustemperatur für die obere Messposition diskutiert. Dabei zeigt sich ein nahezu uniformes Ergebnis aller Temperaturen und Positionen der Thermoelemente. Die ermittelten Liquidustemperaturen entsprechen nahezu der Gleichgewichtstemperatur. Eine Änderung der Kokillentemperierung hat hierbei keinen Einfluss. Die Auswirkung der Kühlung durch die Außenkokille lässt sich

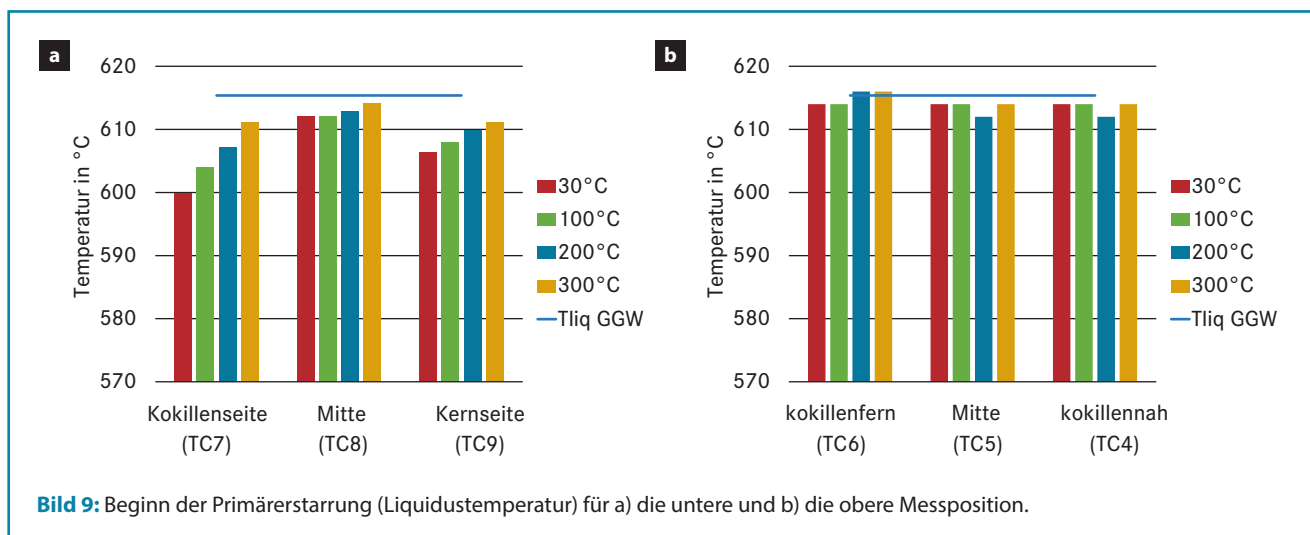


Bild 9: Beginn der Primärerstarrung (Liquidustemperatur) für a) die untere und b) die obere Messposition.

lediglich als um ca. 1 °C gesenkte Liquidustemperatur des mittleren und kokillennahen Thermoelements gegenüber dem kokillernen Element beschreiben. Um diesen Einfluss genauer darzustellen, bietet die genutzte Messmimik jedoch keine hinreichende Messgenauigkeit. Grundsätzlich kann festgehalten werden, dass sich der Effekt einer einseitigen Kühlung an einem Bereich mit hohem Schmelzevolumen kaum auf die Liquidustemperatur auswirkt und auch eine Variation der Temperierung hier keinen Einfluss hat.

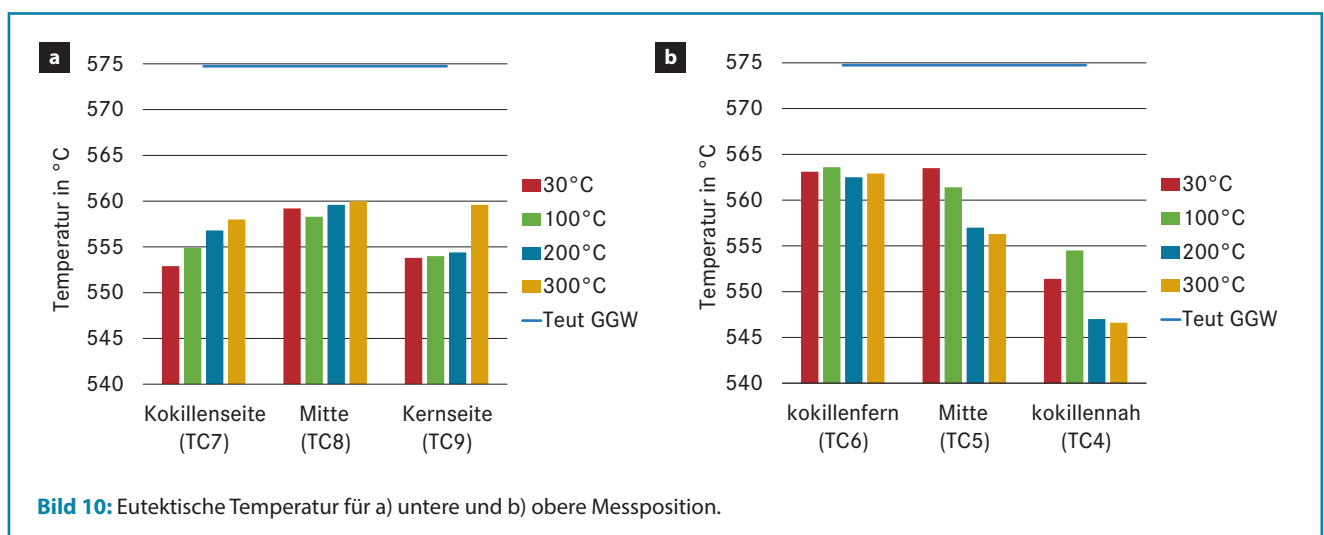
Für die untere Messposition ergibt sich ein anderes Bild. Dies lässt sich sowohl auf den Umstand zurückführen, dass hier ein geringeres Schmelzevolumen vorliegt, das unmittelbar vom Wärmeentzug betroffen ist als auch darauf, dass ein beidseitiger Wärmeentzug über Außenkokille und Innenkern vorliegt. Die hieraus erwartungsgemäß resultierenden höheren Abkühlraten spiegeln sich in den ermittelten Liquidustemperaturen wider, die niedriger liegen und auch entsprechend höhere Unterkühlungen aufweisen. Hierbei zeigt sich, dass sich ein Unterschied für die kokillen- und kernseitige Messposition gegenüber dem dazwischen gelegenen mittleren Thermoelement ergibt. Im Bereich der mittleren Messung ergeben sich Liquidustemperaturen, die wenige Grad Celsius unterhalb der Gleichgewichtstemperatur liegen. Es zeigt sich auch eine geringfügige Abhängigkeit von der Kokillentemperierung, da für die 200 °C- und 300 °C-Temperierung jeweils eine um 1 °C höhere Liquidustemperatur gegenüber der 30 °C- und 100 °C-Temperierung festgestellt werden konnte. Aus den kokillen- und kernseitigen Messungen, die jeweils ca. 3 mm von der jeweiligen Grenzfläche entfernt liegen, kann ein ähnliches Verhalten abgeleitet werden. Hier zeigt sich eine deutliche Unterkühlung von bis zu 15 °C. Die Position des kokillenseitigen Thermoelements ist dabei stärker unterkühlt als die an der Kernseite. Dieser Effekt lässt sich auf die Nähe zu den jeweiligen Grenzflächen sowie das gegenüber der oberen Messposition geringere Schmelzevolumen zurückführen. Die jeweiligen Bereiche sind unmittelbar vom Wärmeentzug betroffen und durch das geringe Schmelzevolumen äußert sich der Effekt der abgeführten Wärme stärker als in einem Bereich, in dem ein identischer Wärmeentzug auf ein größeres Schmelzevolumen gesehen für geringere Unterschiede sorgt. Dass die Kokillenseite stärkere Unterkühlungen zeigt, kann mit der aktiven Kühlung über die Kühlkanäle der Außenkokille begründet werden. Der Innenkern

verfügt hingegen über keinerlei aktive Kühlung, heizt sich daher gerade in den Randzonen schneller auf und die Wärmeabfuhr wird so im Vergleich zur Außenkokille verringert. Der Einfluss der Temperierung zeigt hier auch einen deutlichen Unterschied in den Liquidustemperaturen und so können zwischen den einzelnen Temperierungsstufen Änderungen von bis zu ca. 5 °C liegen. Auf die Höhe der Liquidustemperatur kann in dünnwandigeren Bereichen (hier ca. 16 mm) also Einfluss genommen werden.

Generell besteht für den Bereich der Primärerstarung jedoch das Problem, dass zu einem Zeitpunkt hoher Abkühlraten gemessen wird, die gerade im unteren Bereich des Napfes in Regionen von 10 °C / s liegen können. Die Trägheit der Thermoelemente zusammen mit der darauf basierenden Auswertung über thermische Analyse, die versucht im gegebenen Fall eine verhältnismäßig kleine Änderung im Kurvenverlauf der Temperaturkurve zu finden, legt eine nicht näher zu definierende Ungenauigkeit in der Bestimmung der Liquidustemperatur nahe. Da im weiteren Verlauf die Abkühlraten sinken, sollte die Auswertung der weiteren charakteristischen Temperaturen von diesem Problem nicht betroffen sein. Die für die Primärerstarung diskutierten Ergebnisse sollten daher mehr als Trend denn als belastbare Zahlenwerte verstanden werden.

Auch für die Auswertung der eutektischen Temperatur wird zunächst die obere Messposition betrachtet (Bild 10). Hierbei zeigt sich erneut der Einfluss der Außenkokille auf den kokillennahen Bereich, diesmal in jedoch deutlich ausgeprägterem Umfang, da sich aufgrund der höheren Abkühlrate eine niedrigere eutektische Temperatur einstellt, als an den beiden anderen Thermoelementen. Die mittlere und kokillernen Messung zeigt eine grundsätzlich ähnliche eutektische Temperatur bei einer 30 °C-Temperierung. Werden alle ausgewerteten Temperierungen betrachtet, so zeigt sich sowohl für die kokillennahe, als auch die mittlere Position der Messungen eine Abhängigkeit von der Kokillentemperierung mit sinkenden T_{eut} für steigende Temperierungen. Dies widerspricht den Erwartungen, da eine höhere Temperierung eine geringe Abkühlgeschwindigkeit bedeutet und so wären geringere Unterkühlungen zu erwarten gewesen anstatt ansteigende.

Dass grundsätzlich Unterkühlungen beginnend bei ca. 11 °C vorliegen, erscheint bei einer Strontium-Veredelung mit einhergehender Depression gegenüber der eutektischen Gleichge-



wichtstemperatur im Kokillenguss als sinnvoll. Die markanten Punkte in einer Abkühlkurve zu finden, erweist sich bei der eutektischen Erstarrung bei sehr langsamen Abkühlraten jedoch als schwierig. Infolgedessen können im Rahmen der vorliegenden Auswertung die eutektischen Temperaturen für 200 °C und 300 °C als zu stark fehlerbehaftet gewertet werden, um noch hinreichende Aussagekraft zu haben. Dennoch zeigt sich eindeutig die Möglichkeit einer merklichen Unterkühlung durch einseitige Kühlung eines größeren Schmelzereservoirs bis zu ca. 6 mm Entfernung von der kühlenden Kokille. Für mehr als 10 mm von der Grenzfläche entfernte Positionen ist allerdings nicht mehr mit einer grundsätzlich erhöhten Unterkühlung zu rechnen. Spätestens ab einer Entfernung von 18 mm von der Grenzfläche ist der Einfluss der Temperierung hier als nicht mehr existent anzusehen.

Dass sich dieses Erkenntnis so nicht auf einen dünnwandigeren Bereich übertragen lässt, zeigt die Auswertung der unteren Messposition. Das grundsätzliche Verhalten erweist sich als analog zum Fall der Primärerstarrung: Gegenüber der oberen Messposition kann eine höhere Unterkühlung aufgrund der höheren Abkühlgeschwindigkeiten festgestellt werden. Innerhalb der unteren Messposition zeigen die kokillen- und kernseitigen Thermoelemente wieder ein analoges Verhalten, das von dem der Mitte abweicht. Mittig zeigt sich grundsätzlich eine geringere Unterkühlung, da die Position des Thermoelements nicht in unmittelbarer Nähe zu einer Grenzfläche mit einer Kokille liegt. Weiterhin zeigt sich erneut ein nur äußerst geringer Einfluss der Temperierung, die mit steigender Kokillentemperierung zu minimal erhöhten eutektischen Temperaturen führt. Kokillen- wie auch kernseitig zeigen sich aufgrund der höheren Abkühlraten stärkere Unterkühlungen bzw. eine niedrigere eutektische Temperatur. Eine Veränderung der Kokillentemperierung zeigt an den beiden Positionen ebenfalls eine deutliche Auswirkung auf die eutektische Temperatur, bei der gemäß den Erwartungen eine erhöhte Temperierung einen Anstieg von T_{eut} bedingt. Dies steht in Einklang mit der zugehörigen Änderung der Abkühlrate.

Während bei der Primärerstarrung die kokillenseitige Messung merkbar höhere Unterkühlungen aufwies als auf der kernseitigen Messung, tritt dieser Unterschied für die eutektische Erstarrung in dieser Form nicht mehr auf. Generell sind die Unterkühlungen auf einem ähnlichen Niveau, wobei kernseitig der Anstieg für die eutektische Temperatur der 100 °C- und 200 °C-Temperierung nur geringfügig ausfällt, für 300 °C jedoch auf einem Niveau endet, das einem Trend ähnlich des Anstiegs auf kokillennaher Seite entsprechen würde. Es besteht jedoch auch die Möglichkeit, dass die 300 °C-Auswertung auf der Kernseite einen Ausreißer darstellt und der Einfluss der Temperierung auf die kernseitige Messung nur noch minimal ist. Da nur die Kokillenseite aktiv gekühlt wird, besteht die Möglichkeit, dass es auf der Kernseite ähnlich wie in der Mitte nur noch einen minimalen Einfluss durch die Temperierung gibt, was sich mit den Ergebnissen der oberen Messung decken würde. Die generell ähnlichen Unterkühlungsniveaus auf Kokillen- und Kernseite, die sich im Vergleich zur Primärerstarrung annähern haben, könnten sich dadurch erklären lassen, dass mit vorschreitender Erstarrung die geometrischen Bedingungen an Einfluss gewinnen.

Der Volumenschwund des Gussteils beim Flüssig-fest-Phasenwechsel bedingt kokillenseitig die Bildung eines Luftspalts. Auf der Seite des Innenkerns schrumpft das Gussteil auf und er-

zeugt durch den steigenden Kontaktdruck für einen besseren Gussteil-Kern-Kontakt und damit einen verbesserten Wärmeübergang. Das Angleichen der Unterkühlungsniveaus während der eutektischen Erstarrung im Vergleich zur Primärerstarrung könnte auf dieses Phänomen zurückzuführen sein, bei dem auf der Seite der Außenkokille zwar eine aktive Kühlung vorliegt, der sich bildende Luftspalt jedoch den Wärmeübergang mindert, während auf der Seite des Innenkerns der Wärmeübergang in Folge des steigenden Kontaktdrucks zwar besser wird, die Wärmeleitung aufgrund geringerer Temperaturgradienten durch ein Aufheizen des Innenkerns aber verlangsamt wird.

Schließlich erfolgt eine Auswertung bei Erstarrungsende als letzte markante Temperatur der thermischen Analyse (Bild 11). An der oberen Messposition zeigt sich ein deutlicher Einfluss der Nähe zur Außenkokille. An kokillennaher Messposition sind die geringsten Temperaturen für das Erstarrungsende festzustellen, die höchsten (ca. 20 °C höher liegend) an kokillenferner Messposition. Am mittleren Thermoelement zeigt sich ein eher der kokillenfernen Ausprägung näherer Zwischenwert. Das weist darauf hin, dass das Ende der Erstarrung, also der Phasenwechsel der letzten Bereiche mit Restschmelze, die in den meisten Fällen innerdendritisch vorliegen, stark kinetisch gehemmt ist. Bei schnellerer Wärmeabfuhr erfolgt die vollständige Erstarrung daher bei geringeren absoluten Temperaturen (Unterschiede von 5 °C zwischen den Temperierungseinstellungen können oftmals festgestellt werden) als in Regionen mit geringerer Abkühlrate. Die Auswertung des Einflusses der Kokillentemperierung auf die Erstarrungstemperatur zeigt, dass sich eine Veränderung der Temperierung in diesem Fall an allen drei Messpositionen auf die Erstarrungstemperatur auswirkt. Eine höhere Temperierung entspricht hierbei einem erhöhten T_{Ende} . Dass sich in diesem Fall die Temperierung bis tief in das Bauteil auswirkt, weist ebenfalls auf eine kinetische Hemmung der finalen Erstarrung hin. Gerade während der eutektischen Erstarrung bildet sich oftmals ein Temperaturplateau aufgrund der freigesetzten latenten Wärme, die der Abkühlung entgegenwirkt. Dieser Effekt verliert gegen Ende der Erstarrung an Bedeutung, sodass hier generell mit größeren Unterschieden zwischen den einzelnen Temperierungen zu rechnen wäre, sofern ein entsprechender Einfluss gegeben ist.

Eine Auswertung der Zustände an unterer Messposition weist ein Verhalten auf, das sich analog zu den Erläuterungen an oberer Position verhält. Die kokillen- und kernseitig positionierten Thermoelemente weisen geringere Temperaturen für das Erstarrungsende auf, da dort generell die höchsten Abkühlraten herrschen. Die mittlere Messposition ohne unmittelbare angrenzende Kokille zeigt dementsprechend im Vergleich leicht erhöhte Temperaturen. Ebenfalls analog zur oberen Messposition zeigt sich an allen drei Thermoelementen ein Einfluss der Temperierung, wobei auch hier eine höhere Temperierung zu ansteigenden T_{Ende} führt.

Zusätzlich lässt sich die Gesamtzeit der Erstarrung Δt betrachten, die zwischen Beginn der Erstarrung bei T_{liq} und Ende der Erstarrung bei T_{Ende} vergeht (Bild 12). Es zeigt sich für die obere Messposition, dass die höhere Abkühlrate im kokillennahen Bereich entgegen den Erwartungen eine längere Zeitdauer im Erstarrungsintervall bedingt als in mittlerer und kokillenferner Position, die nahezu identische Werte aufweisen. Der Unterschied beträgt allerdings nur wenige Sekunden und ist damit im Rahmen der Ungenauigkeit der Methode der thermischen Analyse zu vernachlässigen. Der viel wesentlichere Ein-

fluss auf die Erstarrungszeit besteht in der Kokillentemperatur. Hier kann durch eine Temperatursteigerung von 30 °C auf 300 °C mit ca. 40 s gegenüber 70 s nahezu eine Verdoppelung der Erstarrungszeit erreicht werden. An unterer Messposition kann die Erstarrungsdauer Δt , die sich für die Auswertung an den drei Positionen der Thermoelemente ergibt, als uniform bezeichnet werden, da stets quasi identische Werte

vorliegen. Auch hier zeigt sich erneut der markante Einfluss der Kokillentemperatur, der sich analog zur Diskussion an oberer Position auswirkt.

Damit ist die Länge des Erstarrungsintervalls stark von der Kokillentemperatur abhängig, die für unterschiedlich hohe Abkühlraten sorgt. Dies soll durch Vergleich mit **Tabelle 1** näher betrachtet werden. Die Tabelle zeigt die prozentuale Zu-

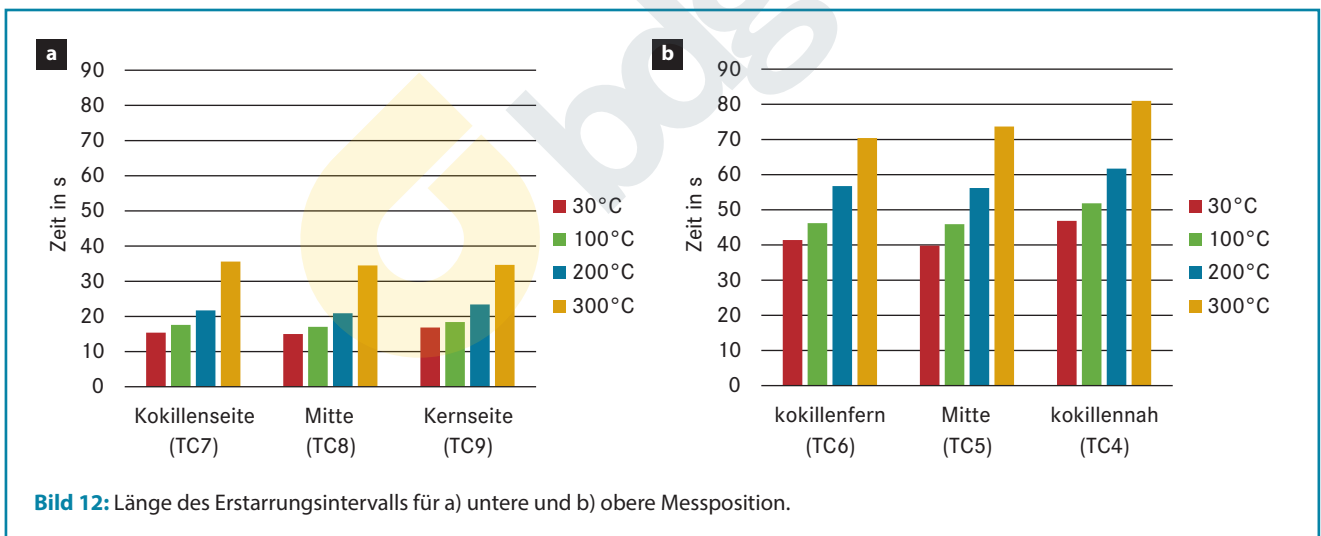
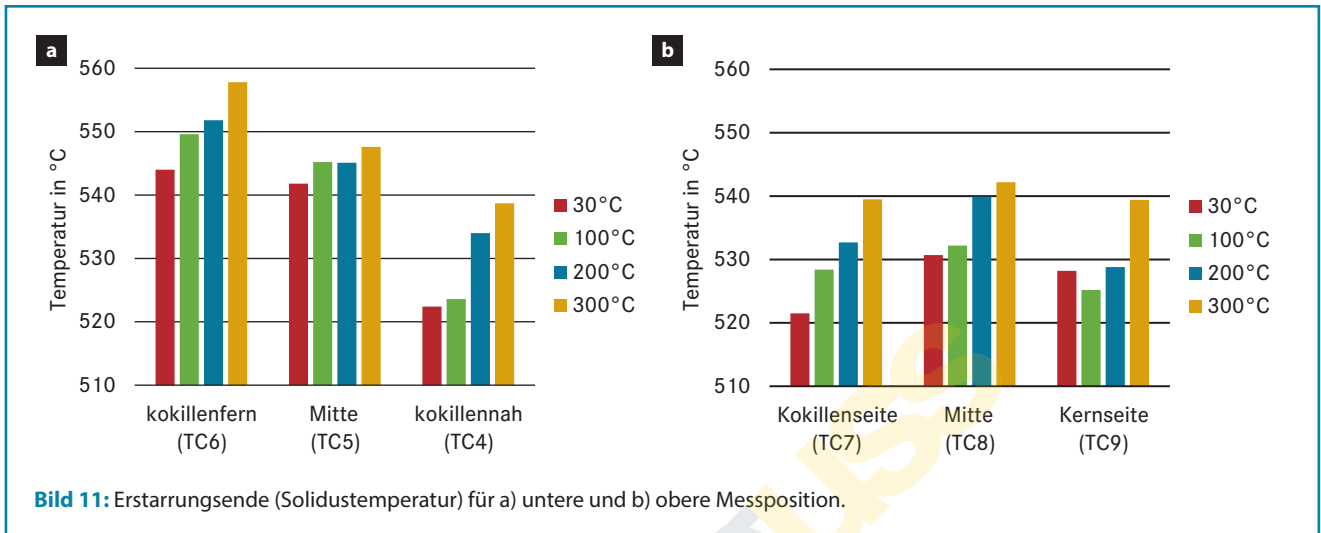


Tabelle 1: Erhöhung der Zeit Δt zum Durchschreiten des Erstarrungsintervalls in % pro erhöhtem °C der Temperierung									
Temperierungsänderung	30 °C → 100 °C	100 °C → 200 °C	200 °C → 300 °C	30 °C → 100 °C	100 °C → 200 °C	200 °C → 300 °C	30 °C → 100 °C	100 °C → 200 °C	200 °C → 300 °C
	Kokillenseite			Mitte			Kernseite		
Δt -Erhöhung pro °C Unten in %	0.2	0.23	0.64	0.2	0.23	0.65	0.13	0.27	0.48
	kokillenseite			Mitte			kokillenseite		
Δt -Erhöhung pro °C Oben in %	0.17	0.23	0.24	0.17	0.22	0.31	0.15	0.19	0.31

nahme des Erstarrungsintervalls pro erhöhtem Grad Celsius zwischen den vier Temperierungsvarianten der Kokille. Für die obere Messposition zeigt sich für alle drei untersuchten Thermo-elemente, dass jede Erhöhung der Temperierung einen umso größeren Einfluss auf die Erstarrungszeit hat, je höher die Temperatur bereits ist. Der Wechsel von 200 °C auf 201 °C kann dabei eine mehr als doppelt so hohe Auswirkung wie der Wechsel von 30 °C auf 31 °C haben.

3.2 Temperaturentwicklungen in Außenkokille und Innenkern

Neben den Temperaturen in der Schmelze sollen auch die thermischen Auswirkungen in den Kokillen bzw. dem Kern diskutiert werden. Hierzu zeigen **Bild 13** und **Bild 14** jeweils die Temperaturverläufe in Außenkokille und Innenkern für die äußeren und inneren Messungen über die Thermo-elemente (vgl. Bild 2). Am Innenkern zeigt sich für die schmelzenahen Messungen ein ausgeprägtes Maximum im Temperaturverlauf. Dies kann an schmelzeferner Position nicht mehr festgestellt werden. Auch an der Außenkokille lässt sich auf schmelzenaher Messposition

ein Maximum feststellen. Im Gegensatz zum Kern bleibt dies auch bei einer schmelzefernen Messung erhalten – wenn auch weniger deutlich ausgeprägt. **Bild 15** trägt die jeweils maximal vorliegenden Temperaturen auf. Bei allen Untersuchungen zeigt sich der zu erwartende Trend, nach dem eine höhere Temperierung zu einem höheren Temperaturmaximum führt. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Temperierungen fallen dabei für die Außenkokille größer aus. Eine um 100 °C erhöhte Temperierung sorgt für einen Anstieg im Temperaturmaximum von ca. 60 °C. Am Kern fallen die jeweiligen Erhöhungen nur etwa halb so groß aus. Hier zeigen sich jedoch die absolut höheren maximalen Temperaturen, was auf das Fehlen einer aktiven Kühlung zurückzuführen ist. Daher bleibt das einmal erreichte Temperaturmaximum auch nahezu gleich oder kühlt im Falle der schmelzenahen Region nur sehr langsam ab. Für die aktiv gekühlte Außenkokille zeigt sich nach Erreichen des Maximums eine Abkühlung auf die ursprünglichen Temperaturwerte. Dabei nähert sich die Kokillentemperatur dem ursprünglichen Wert umso schneller an, je höher die Temperierung gewählt wurde (**Bild 16**). Für die aktiv gekühlte Außenkokille zeigt sich, dass die absolute Temperaturdifferenz für höhe-

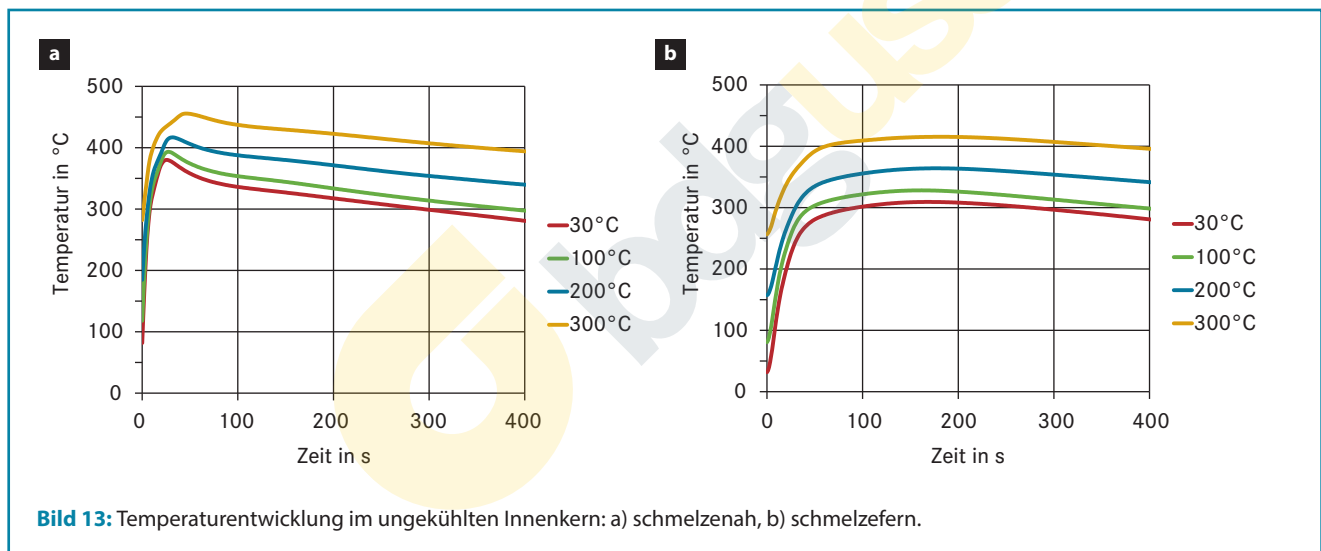


Bild 13: Temperaturentwicklung im ungekühlten Innenkern: a) schmelzenah, b) schmelzefern.

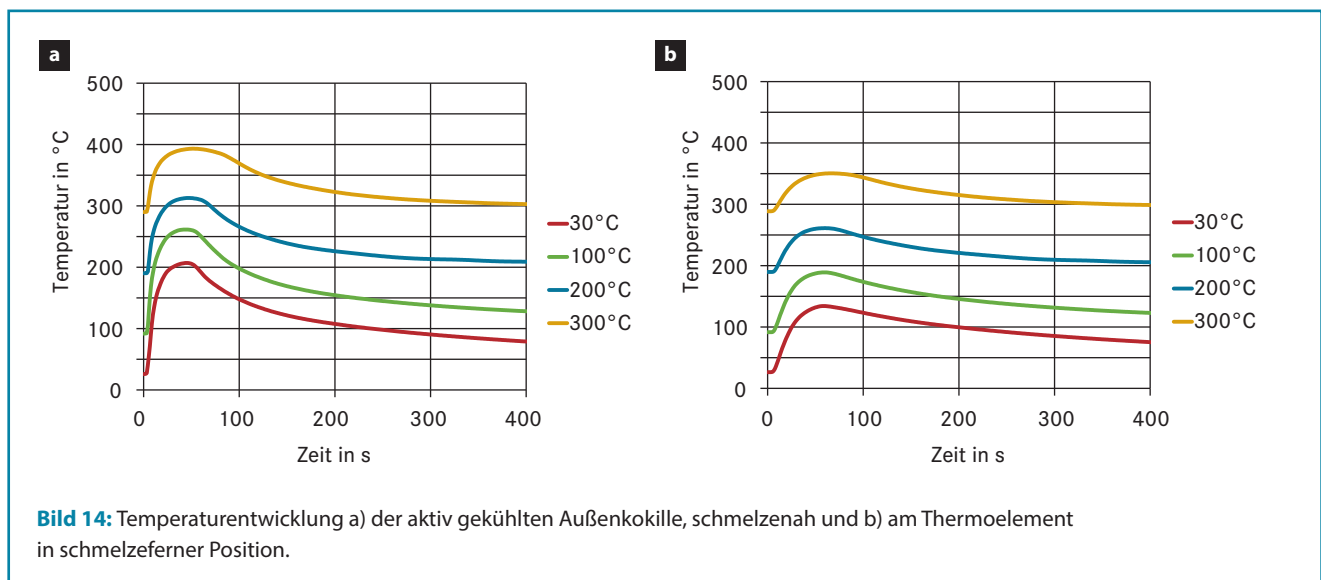


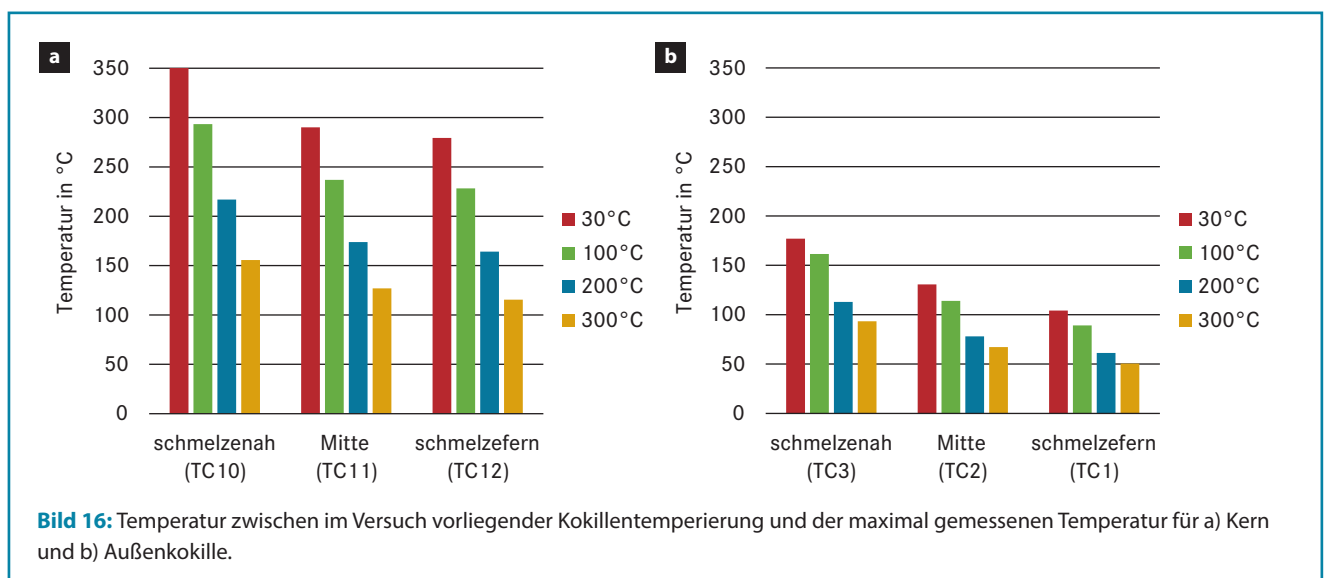
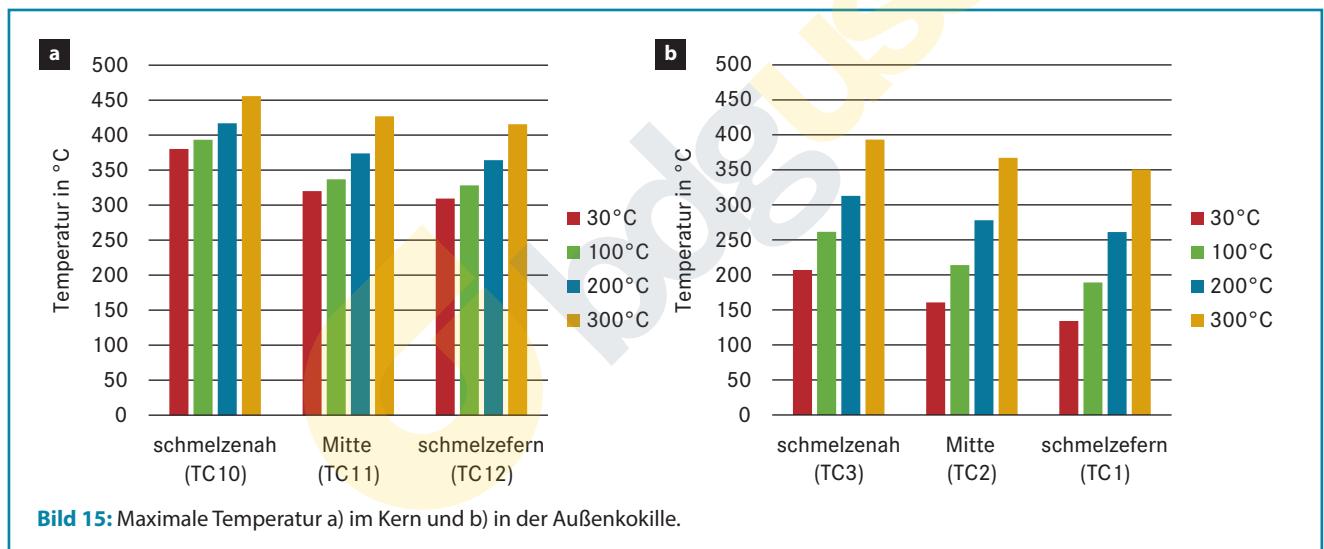
Bild 14: Temperaturentwicklung a) der aktiv gekühlten Außenkokille, schmelzenah und b) am Thermoelement in schmelzeferner Position.

re Temperierungen geringer ist. Das Rückführen auf das anfängliche Temperaturniveau kann somit schneller erfolgen als bei geringeren Temperierungen, da eine geringere absolute Temperaturdifferenz zu kühlen ist. Am Innenkern zeigen sich identische Tendenzen, die in Ermangelung der aktiven Kühlung jedoch deutlich ausgeprägter ausfallen, was sich in höheren absoluten Temperaturdifferenzen am Kern äußert.

Einflüsse des Kühlmediums, das sich beim Durchlaufen der Kanäle zunehmend aufheizt, können bei der Betrachtung vernachlässigt werden. Das in das Heiz-/Kühlaggregat zurückgeführte Öl wies unabhängig von der eingestellten Temperierung eine stets quasi identische Erwärmung von ca. +5 °C gegenüber der eingestellten Temperierung während der Phase der Erstarrung des flüssigen Aluminiums auf.

Aus den experimentell bestimmten Abkühlkurven und deren Analyse lassen sich zwar viele für die Erstarrung charakteristische Daten bestimmen, jedoch besteht aufgrund der begrenzten Lokalität der Messungen nur punktuell eine Information über den Erstarrungsablauf. Diesbezüglich können die Ergebnisse der numerischen Erstarrungssimulation herangezogen werden. In **Bild 17** werden hierzu Zwischenzustände der Er-

starrung zu den jeweiligen Zeitpunkten dargestellt. Dort kann die primär von unten nach oben ablaufende Erstarrung nachvollzogen werden, mit einer „V“-förmigen Erstarrungsfront in den dünnwandigen Bereichen des Bauteils. Die restliche Erstarrung verläuft im Anschluss in Richtung der Eingussposition. Auch lassen sich die Einflüsse der unterschiedlichen Kokillentemperierung aufzeigen. Hierbei zeigt sich deutlich eine Verzögerung im Fortschritt der Erstarrung bei ansteigender Kokillentemperierung. Der Vergleich des Erstarrungsablaufs für 30 °C und 200 °C zeigt, dass im gegebenen Fall die Erhöhung der Temperierung für eine im dünnwandigen Bereich um 10 s verzögerte Erstarrung sorgt. Auch der massereiche Teil des Gussteils zwischen Innenkern und Eingussöffnung ist in ähnlicher Weise von der Temperierung betroffen. Anhand der dargestellten Zustände zum Zeitpunkt von 60 s ist jedoch davon auszugehen, dass der zeitliche Versatz im Vergleich zu den dünnwandigen Bereichen zunimmt, im Falle des Vergleichs der 30 °C- mit der 200 °C-Temperierung also größer ausfällt als die ca. 10 s Verzögerung im unteren Bereich des Napfes. Damit kann festgehalten werden, dass sich die Einflüsse der Temperierung nicht nur auf die kokillennahen Bereiche beschränkt, sondern



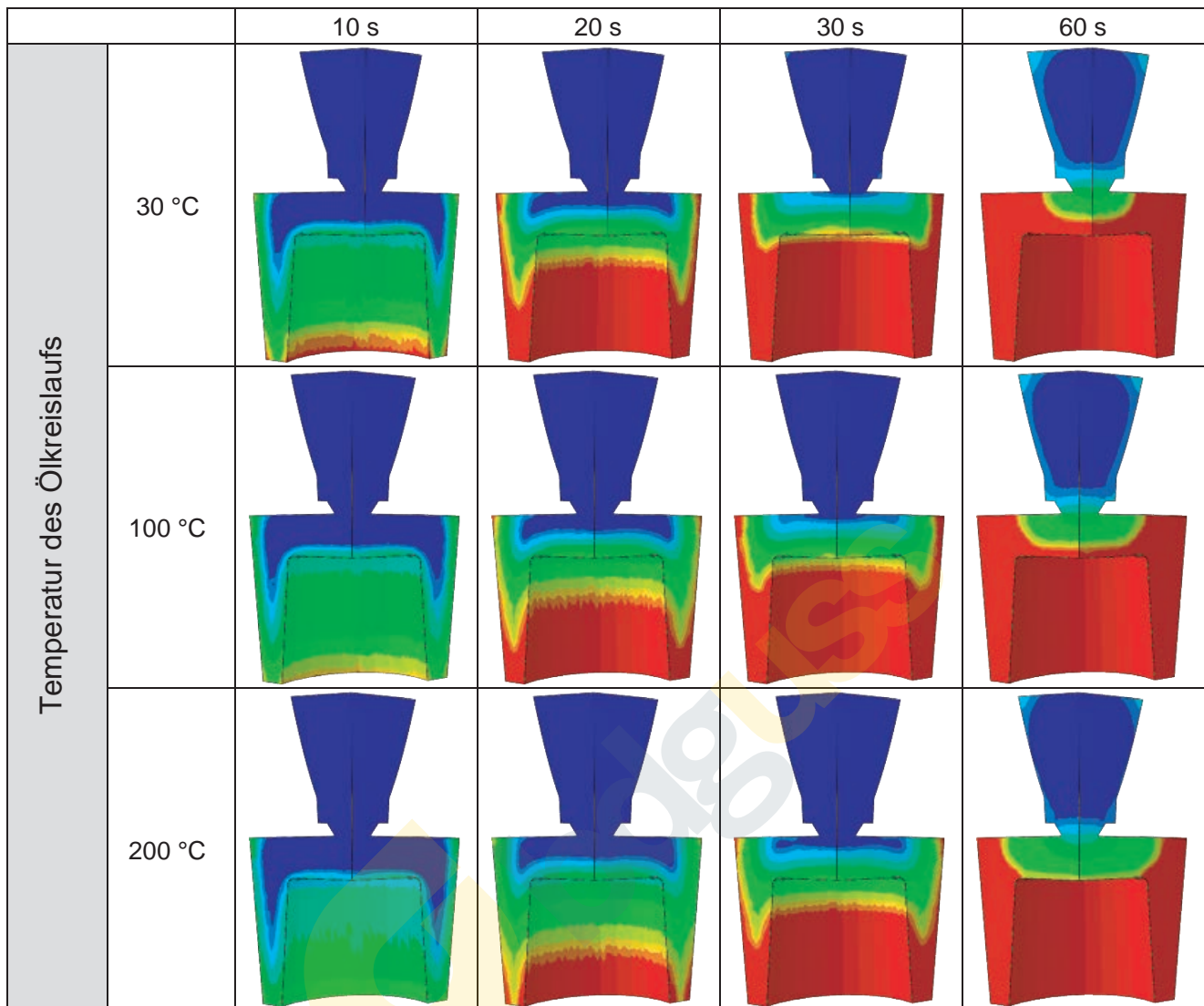


Bild 17: Entwicklung des Festphasenanteils über der Zeit für verschiedene Temperierungen.

die Änderungen im Wärmeentzug das gesamte Bauteil betreffen, wodurch sich der thermische Haushalt durch eine veränderte Kokillentemperatur global beeinflussen lässt.

4 Diskussion und Ausblick

Hinsichtlich der experimentell gewonnenen Ergebnisse stellen die beiden untersuchten Bereiche den einer einseitigen Kühlung eines größeren Schmelzevolumens (obere Messposition) und den einer zweiseitigen Kühlung eines kleineren Schmelzevolumens (untere Messposition) dar. Diese unterschiedlichen Bedingungen spiegeln sich in den Ergebnissen der thermischen Analyse wider, wobei die hierfür genutzte Methodik intrinsische Nachteile aufweist, wodurch die entsprechend ermittelten Ergebnisse keine hohe absolute Präzision bieten. Dies ist vor allem in der Suche nach Wendepunkten begründet, deren präzise Lagebeschreibung sich als schwierig erweisen kann, da die experimentellen Messdaten insbesondere in Prozessabschnitten mit hoher oder sehr niedriger Temperaturänderung die Datenrate oder Präzision für eine akkurate Auswertung unzurei-

chend ist. Dennoch bildet die thermische Analyse im gegebenen Fall immer noch ein hinreichend genaues Verfahren, da es die Auswirkungen der Anwendung verschiedener Einstellungen für die Öltemperierung der Kokille erfolgreich auswerten und Tendenzen klar differenzieren kann. Mit Temperierungsstufen von 30 °C bis 300 °C wird der Fall der Kühlung bei Umgebungstemperatur sowie eine nahezu maximale Einstellung für eine Öltemperierung untersucht, die den gesamten für einen solchen Aufbau möglichen Anwendungsbereich abdecken. Während eine Änderung der Temperierung einen direkten Einfluss auf die Abkühlraten mit schnellerer Wärmeabfuhr bei niedrigerer Temperierung hat, sind die tatsächlichen Einflüsse auf konkrete Details wie Kennwerte der Erstarrung oder den globalen Erstarrungsverlauf nicht zwingend. Unter Berücksichtigung des Einflusses auf die Primärerstarrung stellt sich heraus, dass aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit der flüssigen Aluminiumlegierung auch Bereiche in unmittelbarer Nähe der Grenzfläche zwischen Kokille und Schmelze grundsätzlich nicht beeinflusst werden, solange ein größeres Volumen flüssiger Schmelze in dieser Region vorhanden ist. Die daraus abgeleiteten Liquidustemperaturen liegen hier nahe an der Gleich-

gewichtstemperatur und die unterschiedlichen Einstellungen der Temperierung haben keinen signifikanten Einfluss. Liegt ein kleineres Schmelzevolumen wie bei der unteren Messposition vor, ist ein Einfluss auf die Primärerstarrung möglich. Bei Messungen in der Nähe der Grenzfläche zu der Kokille/dem Kern besteht eine ausgeprägte Unterkühlung. Diese Unterkühlung kann durch eine Änderung der Temperierung zu geringeren Temperaturen weiter erhöht werden.

Für die eutektische Erstarrung in der unteren Position wiederholt sich dieses Verhalten, obwohl der Unterschied in der Unterkühlung zwischen den einzelnen Temperierungsstufen kleiner ist als bei der Primärerstarrung. Auch in Bezug auf die eutektische Temperatur ist es nun möglich, Bereiche mit einem größeren Schmelzevolumen zu beeinflussen, obwohl dieser Einfluss nur innerhalb eines Abstands von bis zu 6–10 mm zur Grenzfläche eine signifikante Auswirkung hat. Weiterhin ist eine starke Beeinflussung der Temperatur des Erstarrungsendes, dem Temperaturintervall der Erstarrung sowie der Erstarrungszeit möglich. Hierbei können Bereiche mit unterschiedlichen Schmelzevolumina individuell beeinflusst werden. Eine entsprechende Anpassung der Temperierung erlaubt eine gezielte Veränderung, die insbesondere den Wärmehaushalt nahe der Schmelze-Kokille-Grenzflächen betrifft, tiefer im Bauteil liegende Zonen von im Vergleich hohen Schmelzevolumen jedoch kaum beeinflusst.

Die Auswertung der Temperaturentwicklung innerhalb der Kokille/des Kerns ermöglicht eine Abschätzung des auftretenden Temperaturanstiegs innerhalb einer Kokille mit oder ohne aktive Kühlung während des Gießprozesses.

Die aufgezeigten Effekte und Tendenzen für einen Aluminiumgießprozess können zur Optimierung in der Prozessplanung berücksichtigt werden. So lässt sich die Eignung einer bestimmten Temperierungseinstellung der jeweiligen Bereiche abschätzen, um sowohl die Erstarrung in gewünschter Richtung zu beeinflussen als auch das Aufheizen gewisser Kokillenteile zu begrenzen, ohne die Erstarrung zu sehr zu verändern. Zusätzliche Auswirkungen der Temperierung könnten durch die Auswertung der Messwerte für die Bewegung von Kokille und Gussteil und der am Kern herrschenden Kontaktdrücke aufgezeigt werden. Hierdurch ließen sich die Einflüsse der Temperierung auf den Gießprozess durch Beschreibung des Spaltbildungsverhaltens entlang der Außenwand des Gussteils und des durch ein Aufschumpfen auf den Innenkern steigenden Kontaktdrucks beschreiben. Dies würde eine tiefer gehende Betrachtung der Einflüsse einer ein- bzw. beidseitig abkühlenden Region und der dahinterstehenden Mechanismen erlauben, die durch die Temperierung beeinflusst werden.

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.

Thomas Vossel M.Sc., Dipl.-Ing. Nino Wolff, Dr.-Ing. Björn Pustal und Univ. Prof. Dr.-Ing. Andreas Bührig-Polaczek, Gießerei-Institut der RWTH Aachen, Aachen

Literatur

- [1] *Gießerei-Praxis* (1987), [Nr. 1/2], S. 1-7.
- [2] *Aluminium* (1984), [Nr. 60], S. 581-586.
- [3] *International Journal of Cast Metals Research* (1998), [Nr.11], S. 113-125.
- [4] *Gießerei-Praxis* (1993); [Nr. 5], S. 68-76.
- [5] *Acta Polytechnica Hungarica*, Vol. 10 (2013), [No. 3], S. 65-78.
- [6] *Journal of Materials Processing Technology* (2008), [Bd. 207], S. 107-111.
- [7] *Giesserei* 79 (1992), [Nr. 1], S. 125-134.
- [8] *AFS Transactions* (1984), S. 297-307.
- [9] *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* 48 (2017), [Nr. 12], S.1220-1225.
- [10] *Laschet, et al., Multiscale solidification simulation of an axisymmetric A356 component in die casting, Proc. of the 6th Decennial Int. Conf. on Solidification Processing (SP17), Old Windsor, UK, July 2017, S. 576-580, SS Media, U.K., ISBN 978-1-90854929-7.*
- [11] *Giesserei Special* (2017), [Nr. 2], S. 134-137.