



FOTO: BÜHLER

Lost Core-Technologie – offen für alle

Chancen und Grundlagen des Verfahrens

Die Bühler-Spezialisten teilen ihr Wissen und ihre Erfahrung zum Thema Lost Core.

VON DARIO PIERRI UND CHRISTIAN BECK, UZWIL, SCHWEIZ

Mit dem Lost Core-Verfahren können gänzlich neue Bauteile entwickelt und die innere Formgebung deutlich komplexer gestaltet werden. Doch beim Einsatz von Salzkernen gilt es mehrere Faktoren zu beachten.

Grundsätzlich wird die Festigkeit der Salzkernkerne maßgeblich von der eingesetzten Salzmischung beeinflusst. In der Forschungsabteilung der Bühler AG, Uzwil, Schweiz, wurden verschiedene Salzmischungen im Hinblick auf ihre Biegefestigkeit getestet und untereinander verglichen. Die Grundlage dafür bildeten die Untersuchungen der Tohoku University und von Y. Yamada [1] aus dem Jahr 2007. Die höchste Biegefestigkeit wurde mit dem Gewichtsverhältnis 38 % KCl zu 62 % Na₂CO₃ erzielt.

Generell gilt, dass die Festigkeit einer Salzzusammensetzung dann am niedrigsten ist, wenn sie im Eutektikum oder ihre

reinen Komponenten einzeln betrachtet werden. Die höchste Festigkeit wird als intermediäre Zusammensetzung zwischen

Tabelle 1: Physikalische Eigenschaften der Salzmischung 38 % KCl – 62 % Na₂CO₃ [2].

Materialeigenschaft	Fest	Flüssig
Solidustemperatur in °C	-	588
Liquidustemperatur in °C	-	640
Dichte in kg/dm ³	2,33	1,8
Spezifische Wärmekapazität in kJ/kg·K	1,0-1,1	1,6-1,7
Wärmeleitfähigkeit in W/m·K	2,2	1,6
Schmelzenthalpie in kJ/kg	-	~400
Wärmeausdehnungskoeffizient in K ⁻¹	2e ⁻⁵ bei T = 20 °C 6e ⁻⁵ bei T = 500 °C	-
Viskosität in mPas	-	ca. 1
Elastizitätsmodul in N/mm ²	>10 000	-
Poisson-Zahl	0,18-0,24	-
Biegefestigkeit in MPa	23-39	-
Erstarrungsschwindung in %	-	18,5
Festkörperschwindung in %	1,5-2,2	-

*Sofern nicht anders erwähnt, handelt es sich bei den prozentualen Angaben zur Zusammensetzung um Massenanteile.

dem Eutektikum und der reinen Komponente erreicht (Bild 1). Die Primärpartikel übernehmen dabei im Falle der Rissbildung eine Umlenkfunktion (Bilder 2 und 3). Ermittelt und berechnet wurde die Biegefestigkeit unter der Verwendung von Prüfkörpern im 3-Punkt-Biegeversuch (Bild 4). Die Biegefestigkeit weist eine hohe Streuung zwischen 23 MPa und 39 MPa auf (Bild 5), sodass bei der Auslegung immer vom niedrigsten Wert ausgegangen wird. Dieses Verhalten ist jedoch typisch für Salzkern und mit dem Verhalten von keramischen Materialien vergleichbar. Andere Salzzusammensetzungen weisen eine ähnlich große Streuung auf.

Neben der Biegefestigkeit müssen auch weitere physikalische Eigenschaften der verwendeten Salzzusammensetzung beachtet werden (Tabelle 1).

Für den Prozess der Salzkernherstellung sind die Liquidustemperatur, die Dichte und die Wärmeleitfähigkeit maßgeblich. Die Liquidustemperatur der eingesetzten Salzmischung entspricht in etwa der Aluminiumtemperatur während des Füllvorgangs. Da der Füllvorgang im Aluminium-Druckgießprozess nur wenige Millisekunden dauert und das Aluminium wegen der hohen Wärmeleitfähigkeit sehr schnell erstarrt, wird der Salzkern während des Umgießens mit Aluminium jedoch nicht aufgeschmolzen. Im Hinblick auf die Dichte ist der große Unterschied zwischen dem festen und dem flüssigen Zustand des Salzkerns zu beachten. Das Volumen des Salzkerns nimmt während der Erstarrung um rund 18,5% ab. Zu guter Letzt verlangsamt die niedrige Wärmeleitfähigkeit die Erstarrung während der Nachdruckphase und verlängert so die Zykluszeit.

Salzkern herstellen

Der Prozess für die Herstellung von Salzkernen ist dem Aluminium-Druckgießprozess ähnlich. Das Salz wird in einem Tiegelofen aufgeschmolzen. Die Dosiermenge wird mit einem Schöpfgerät in die Gießkammer dosiert und danach mit dem Gießkolben in die Form hineingedrückt. Allerdings gibt es auch einige Unterschiede zu beachten: So werden für die Herstellung von Salzkernen ein dickerer Anschnitt, eine höhere Formtemperatur, eine niedrigere Füllgeschwindigkeit sowie eine längere Nachdruckphase und eine nachträgliche Wärmebehandlung für rissanfällige Salzkern benötigt.

Der Anschnitt muss dicker als beim Aluminiumgießen gestaltet werden, um ein vorzeitiges Verschließen zu vermeiden. Denn Salz erstarrt sehr schnell.

KURZFASSUNG:

Viele Druckgussteile erfordern den Einsatz von Hinterschneidungen und medienführenden Kanälen. Diese können heutzutage nicht aus einem Guss hergestellt werden. Für gewisse Bauteilgeometrien bietet sich jedoch das Lost Core-Verfahren als eine interessante Lösung an. Hierbei werden Salzkern im Druckgießverfahren von Aluminium umgossen und dann mit Wasser unter Hochdruck ausgewaschen.

Nun gibt Bühler alle Patente zu diesem Verfahren frei und stellt das entsprechende Technologiewissen dem Markt zur Verfügung. Dies umfasst die Patentfamilien EP 2 022 577 A1, EP 2 277 644 A1 und EP 2 425 910 A1 mit Schutzrechten in Europa, Japan und den USA. In diesem Beitrag werden die technologischen und wirtschaftlichen Grundlagen des Verfahrens skizziert.

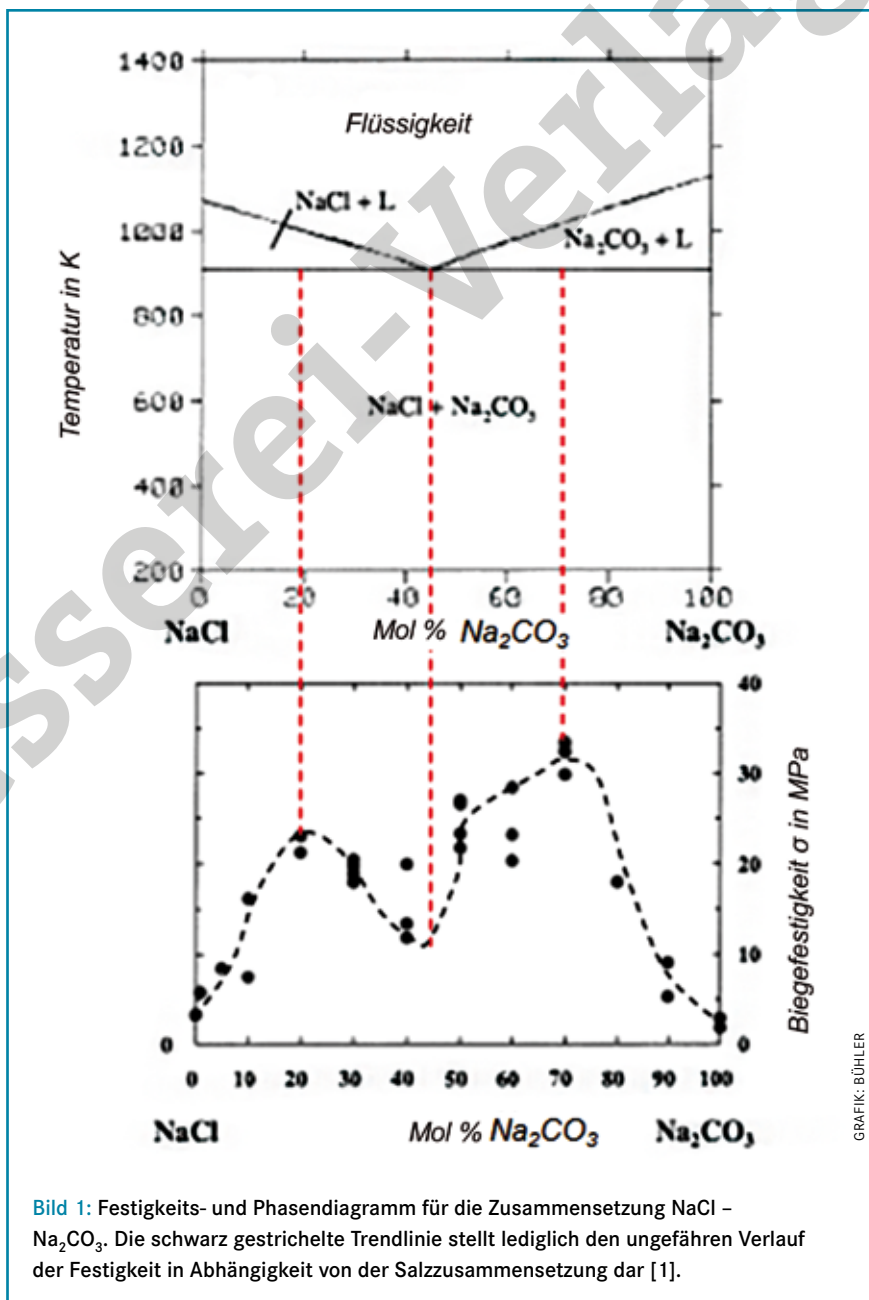
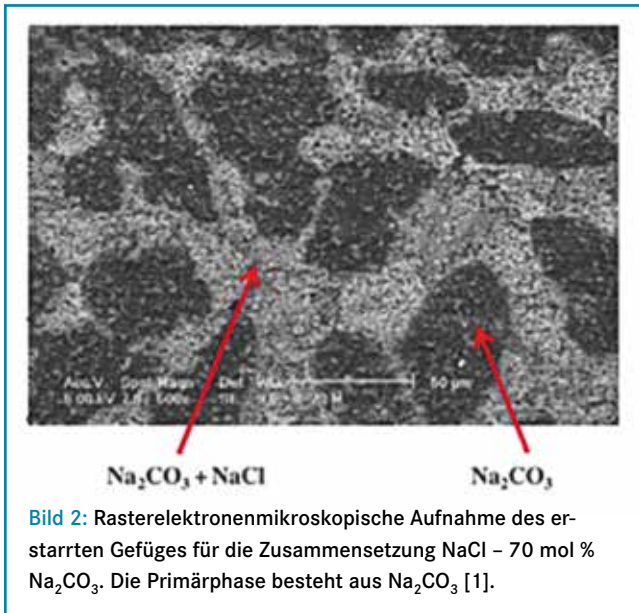


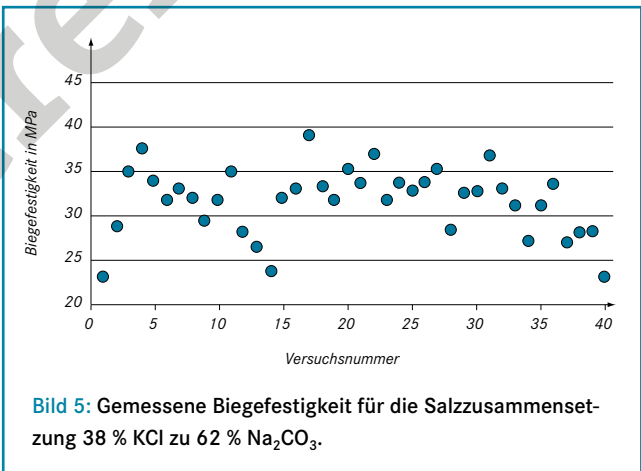
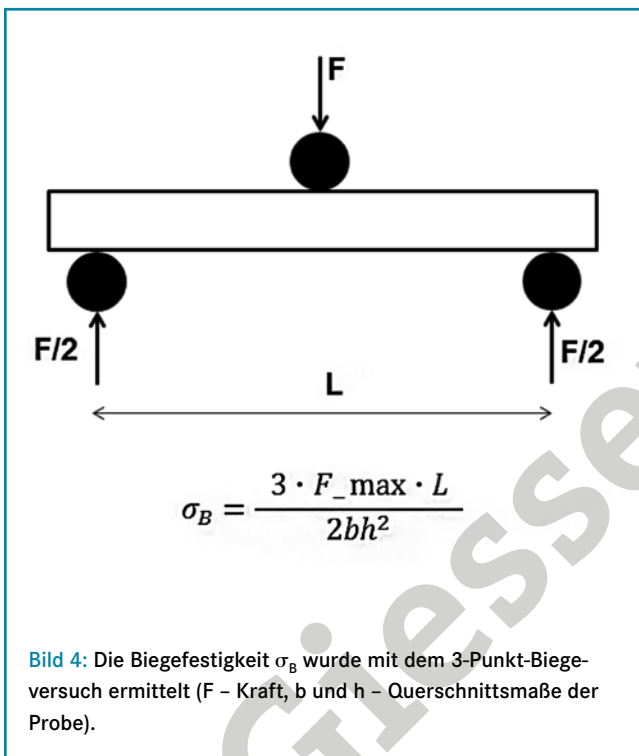
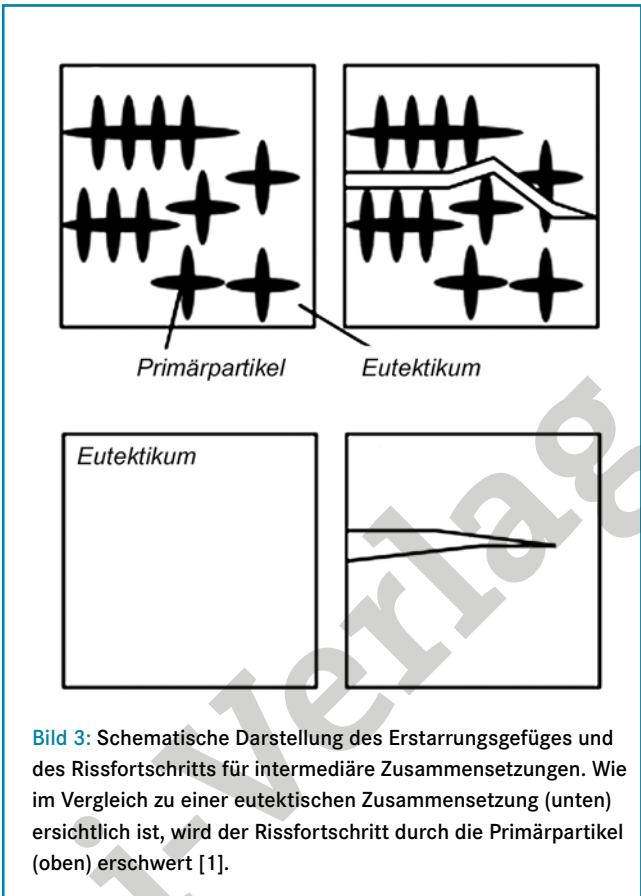
Bild 1: Festigkeits- und Phasendiagramm für die Zusammensetzung NaCl - Na₂CO₃. Die schwarz gestrichelte Trendlinie stellt lediglich den ungefähren Verlauf der Festigkeit in Abhängigkeit von der Salzzusammensetzung dar [1].

Durch den dickeren Anschnitt kann für längere Zeit nachgedrückt und so die Erstarrungsschwindung von 18,5% teilweise kompensiert werden.

Auch eine höhere Formtemperatur mindert den Effekt der Randerstarrung, der an dünnen Stellen des Kerns das komplette Füllen der Kavität erschweren wür-



GRAFIKEN: BÜHLER



de. Zugspannungen und Defekte an der Oberfläche des Salzkerns lassen sich – wie Versuche von Yamada [3] gezeigt haben – durch höhere Formtemperaturen reduzieren.

Eine niedrigere Füllgeschwindigkeit verhindert, dass die Salzschnmelze aufgrund ihrer geringeren Viskosität aus der Form herauspritzt.

Da die Wärmeleitfähigkeit des Salzes niedriger ist als jene von flüssigem Aluminium, bedarf es in der Regel einer längeren Nachdruckphase.

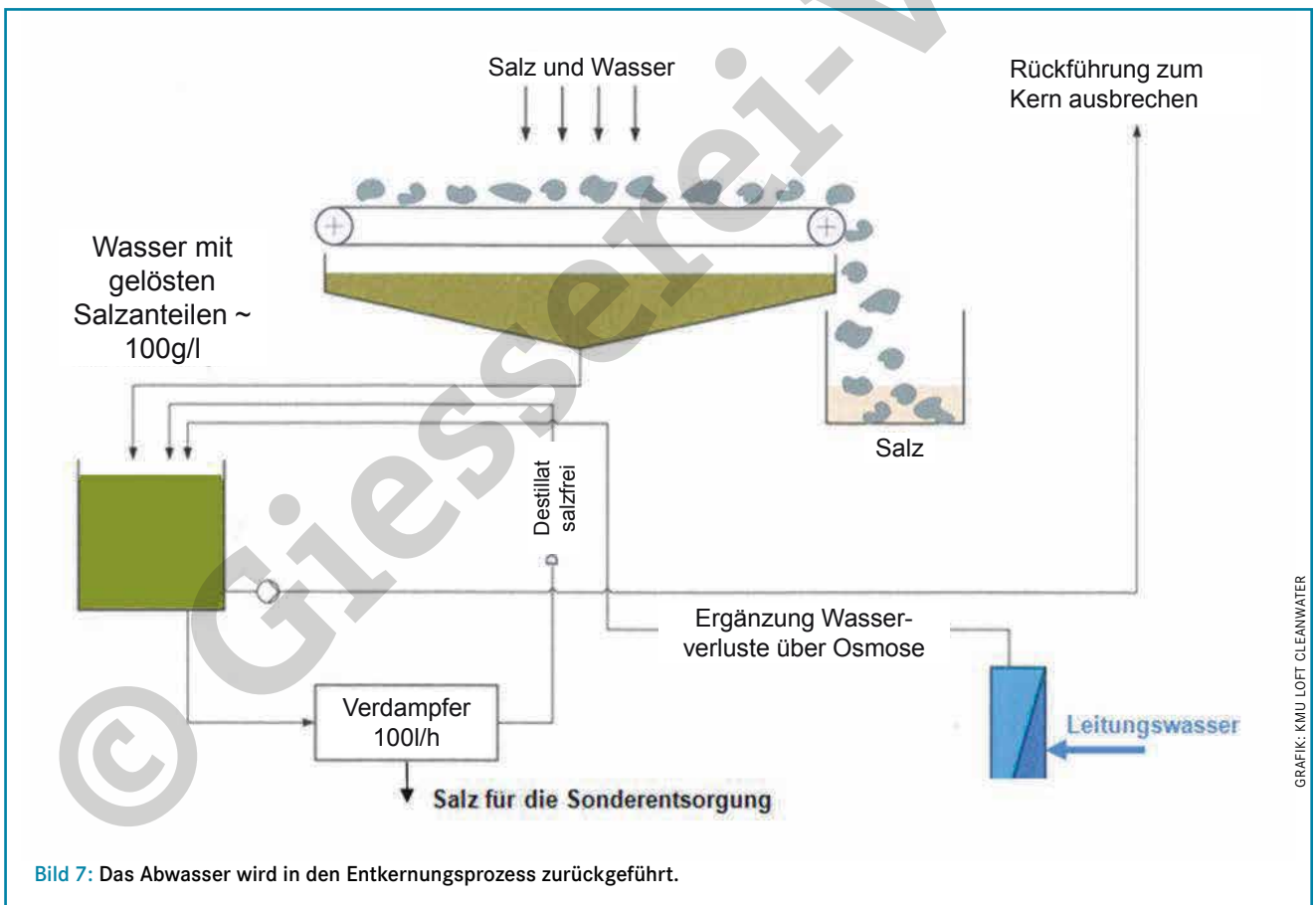
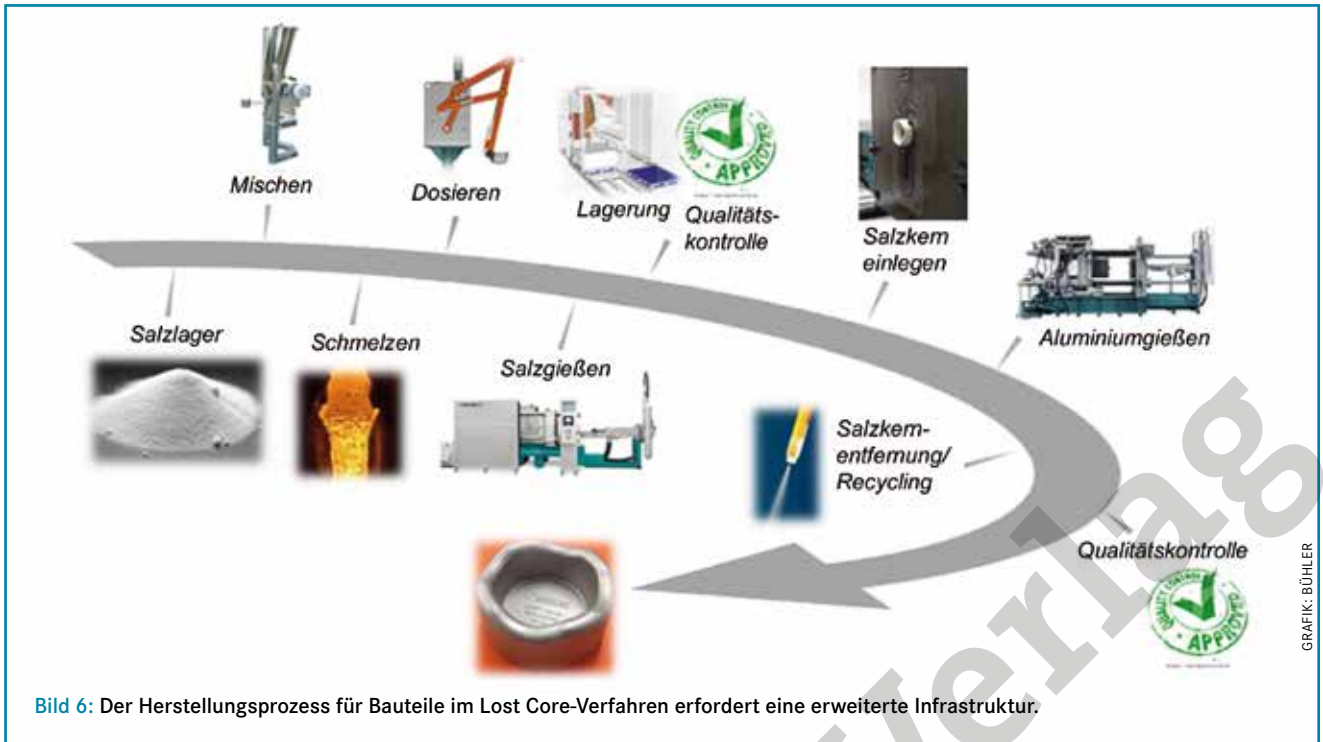
Für rissanfällige Salzkerns ist eine nachträgliche Wärmebehandlung notwendig. Falls bei einem Salzkernstyp beim Abkühlen an der Außenluft Risse auftreten,

muss dieser wärmebehandelt werden. Dies betrifft insbesondere dickere Salzkerns, da der hohe Temperaturgradient über die Dicke zu thermischen Spannung führt. Die Wärmebehandlung dauert eine Stunde und findet bei 250 °C statt.

Infrastruktur

Werden Aluminiumbauteile mit der Lost Core-Technologie hergestellt, bedarf es einer erweiterten Infrastruktur (Bild 6). Im Mischer werden die zwei Salzkomponenten mittels einer Förderschnecke grob gemischt und in einen Schmelzofen mit Keramiktiegel hineindosiert. Das Keramikmaterial muss gegen Salzschnmelzen und

Thermoschock beständig sein. Dort wird das Gemisch aufgeschmolzen und mit einem Schöpfergerät aus Inconel 600 und einer Wanddicke von max. 1 mm in die Gießkammer dosiert. Dieser Werkstoff ist beständig gegen Salzschnmelzen und hohe Temperaturen. Der Schöpflöffel wird während der Wartezeit komplett eingetaucht, damit anhaftendes Salz aufgeschmolzen werden kann. Mit einer Standard-Druckgießmaschine wird der Salzkern dann gegossen und je nach Komplexität der Salzkerngeometrie anschließend einer Qualitätskontrolle unterzogen. Da die Salzkerns die Feuchtigkeit aus der Umgebungsluft sehr schnell aufnehmen, müssen sie für die Lagerung in Siegelrandbeuteln aus Alu-

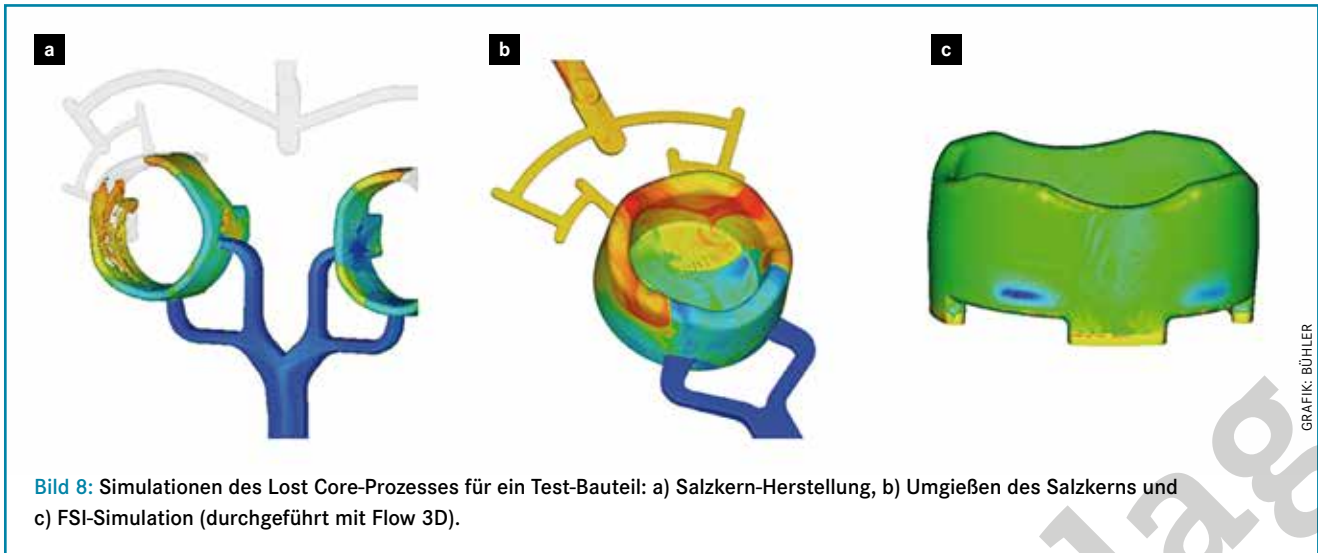


minium unter Vakuum verpackt werden. Im nächsten Schritt erfolgt das Aluminiumdruckgießen. Besondere Aufmerksamkeit muss dabei darauf gelegt werden, dass die Nachdruckphase erst nach dem kompletten Umgießen des Salzkerns einsetzt. Hierfür ist die hohe Reproduzierbarkeit der Füllphase unumgänglich, was

nur durch den Einsatz einer echtzeit-regelten Druckgießmaschine erreicht werden kann. Auch unnötige Belastungen des Salzkerns durch eine überbestimmte Lagerung sind zu vermeiden.

Nach dem Aluminiumgießen werden die Salzkerns mit Wasser unter Hochdruck aus dem Bauteil herausgespült. Die

Zykluszeit für den Entkernungsprozess ist meist sehr lang, wodurch das Entkernungswerkzeug zwangsläufig so konzipiert werden muss, dass mehrere Bauteile gleichzeitig bearbeitet werden können. Das entkernte Salzmaterial kann recycelt werden. Allerdings ist dies sehr zeit- und kostenintensiv, weshalb die umweltge-

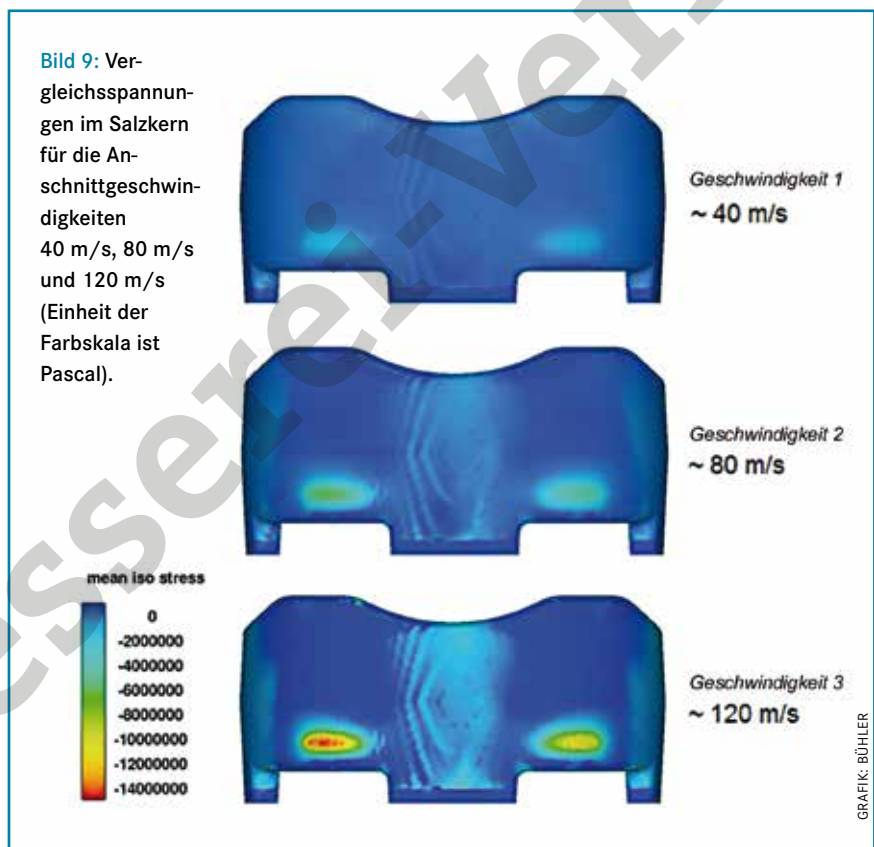


rechte Entsorgung wirtschaftlicher ist. Das Abwasser hingegen wird in der Regel rückgeführt, sodass weitere Kerne damit herausgelöst werden können (Bild 7). Ein Salzgehalt-Kontrollbehälter stellt dabei sicher, dass der Salzgehalt nicht über rund 100 g/l steigt. Der Entkernungsprozess und die Abwasseraufbereitung sind sehr kostenintensiv und verursachen Kosten in Höhe der Salz Kernherstellkosten. Dies ist insbesondere bei der Wirtschaftlichkeitsberechnung zu berücksichtigen.

Simulationen

Wird ein Bauteil im Lost Core-Verfahren gefertigt, sind Simulationen unumgänglich (Bild 8). Sowohl für die Salz Kernherstellung als auch für das Aluminiumdruckgießen wird eine Füllsimulation durchgeführt. Damit können die Kanalgestaltung, die Entlüftungstechnik sowie die Position und die Geometrie des Anschnitts überprüft und optimiert werden. Bei der Salz Kernherstellung darf keine Luft beim Füllen eingemischt werden. Dies könnte zusammen mit der Bauteilerstarrung zu Rissen führen. Des Weiteren wird die Füllsimulation auch verwendet, um verschiedene Gießprofile miteinander zu vergleichen. Mit der Erstarrungssimulation lassen sich Zonen eruieren, wo möglicherweise mit Erstarrungsporosität zu rechnen ist.

Mit der Fluid-Struktur-Interaktionssimulation (FSI) werden grundsätzlich die durch die Aluminiumschmelze auf den Kern wirkenden Kräfte berechnet (Bild 9). Da sich jedoch verschiedene Faktoren, wie beispielsweise die Lagerung des Kerns und die Berechnung der Wärmeeinbringung in den Salz Kern, nur schwer in der Simulation abbilden lassen, ist deren Aussagekraft eingeschränkt. Eine weitere Einschränkung der FSI-Simulation ist das



Fehlen von temperaturabhängigen mechanischen Eigenschaften des Salz Kerns. Zudem sind diese inhomogen, da die Mikroporen aus der Erstarrung unregelmäßig über den Salz Kern verteilt sind. Diese Einschränkungen limitieren die quantitative Aussagekraft der FSI-Simulation.

Design-Richtlinien für Salzkerne

Bei der praktischen Anwendung des Lost Core-Verfahrens gibt es mehrere Aspekte zu berücksichtigen:

Das Schwundverhalten ist gegenüber dem Aluminiumdruckgießen erhöht und

abhängig von der Salz Kerngeometrie. Bei dünnwandigen Salz Kernen (5-7 mm) beträgt der Schwund ca. 1,3-1,5 %. Bei größeren Wanddicken erhöht sich der Schwund auf bis zu 2-2,2 %.

Der Salz Kern muss in der Form freischwimmen können. Eine U-Form kann zum Reißen des Salz Kerns führen. Dem wird durch vergrößerte Entformungsschrägen und durch großzügiges Abrunden von Übergängen entgegengewirkt (Bild 10).

Ring-Geometrien, wie sie z. B. ein Wassermantel aufweist, müssen auf der innenliegenden Seite mindestens 2° Entformungsschräge aufweisen.

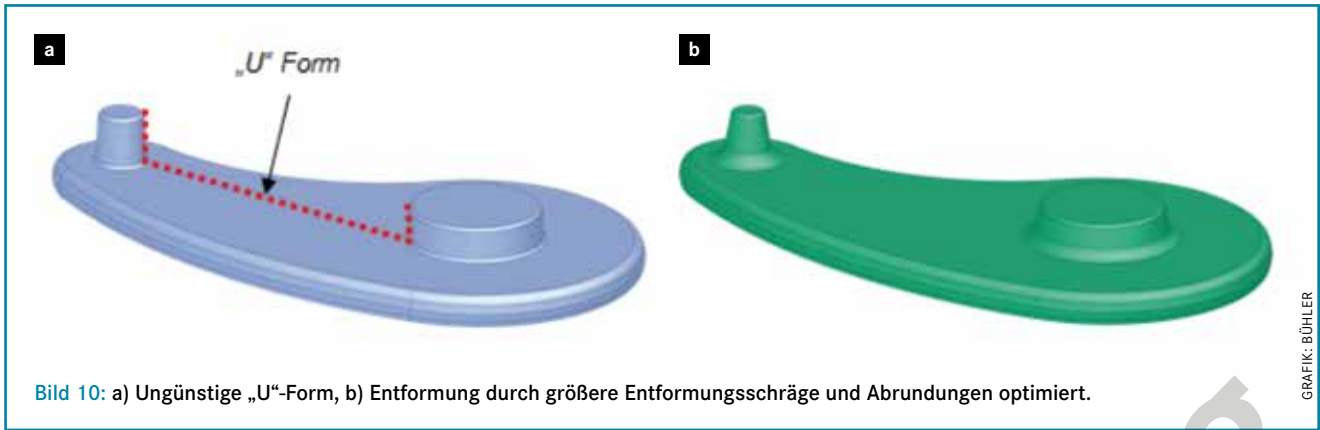


Bild 10: a) Ungünstige „U“-Form, b) Entformung durch größere Entformungsschräge und Abrundungen optimiert.

Der Salzkern darf nicht lose in der Form liegen. Durch kleine Rillen bei der Kernaufnahme wird dieser leicht eingeklemmt. Auch geringe Maßabweichungen, die aufgrund des Schwundverhaltens der Salzschnmelze auftreten, können so ausgeglichen werden (Bild 11). Im optimalen Fall definiert eine Lagerstelle nur die horizontale Position und eine zweite Lagerstelle die vertikale Verschiebung. Grundsätzlich muss jedoch eine Ausdehnung des Salzkerns durch Wärmeaufnahme möglich sein, ohne dass Druckstellen entstehen. Auch verhindern die Lagerstellen Rotationen des Kerns während er mit Aluminium umgossen wird. Darüber hinaus dürfen keine weiteren Fixierungen vorgenommen werden. Allerdings haben sich bei langen Salzkernen Abstützungspunkte als sehr hilfreich erwiesen. Diese müssen beim Einlegen freistehen und dürfen beim Schließen der Form keine Spannungen verursachen.

Da Salzkern meist nur einen kleinen Teil des Bauteils darstellen, ist das Volumen eher gering und somit der Füllgrad in der Gießkammer niedrig. Durch den Einsatz einer mehrfachen Kavität kann der Füllgrad erhöht werden. Diese Maßnahme reduziert den Wärmeverlust der Salzschnmelze und minimiert die Salzvorerstarrungen. Auch das langsame Füllen erzeugt frühe Erstarrungen der Randschicht in der Gießkammer. Gelangt diese in die Kavität, treten Risse auf. Daher muss der Kanal im Verhältnis zum Bauteil ein großes Volumen aufweisen. Die Anschnittfläche muss wie bei einem Squeeze-Teil ausgeführt werden, damit mit möglichst geringer Geschwindigkeit ein Bauteil vollständig gefüllt und anschließend lange nachgedrückt werden kann. Für den weiteren Prozess ist es sinnvoll, den Anschnitt auf eine Lagerstelle zu positionieren, damit das Trennen des Kanals durch Brechen möglich ist. Das Stanzen ist im Salzprozess nicht möglich. Durch das langsame Füllen kann der Entlüftungs-

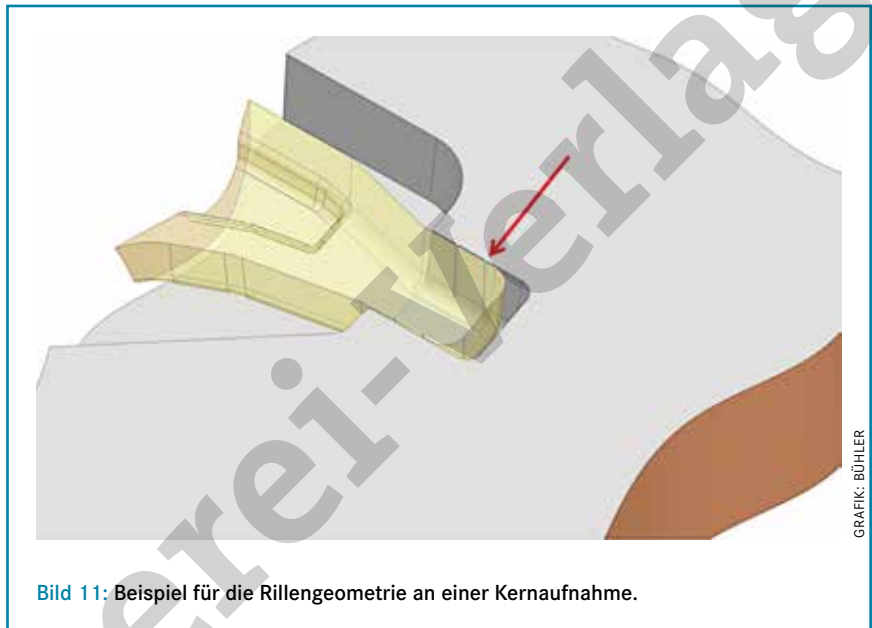


Bild 11: Beispiel für die Rillengeometrie an einer Kernaufnahme.

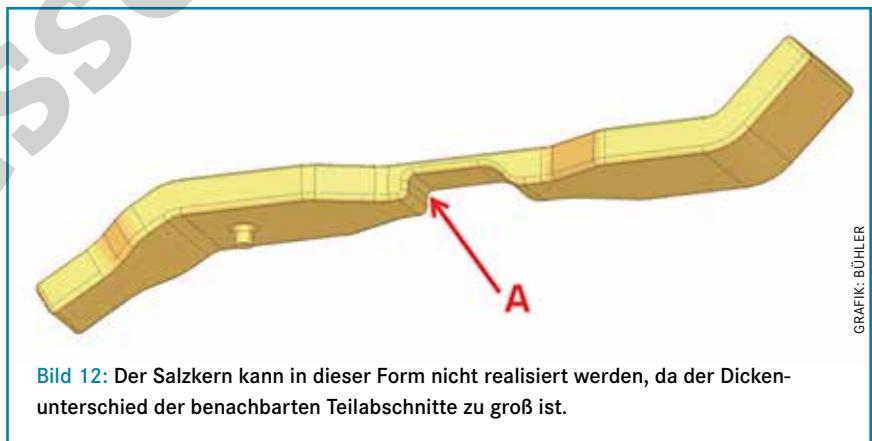


Bild 12: Der Salzkern kann in dieser Form nicht realisiert werden, da der Dickenunterschied der benachbarten Teilabschnitte zu groß ist.

querschnitt bei der Salzkernherstellung klein gehalten werden. Für die Entlüftung mit einem Waschbrett ist ein Spaltmaß von 0,3 mm empfohlen, da das flüssige Salz bei größeren Massen herausspritzen kann.

Physikalische Grenzen des Verfahrens

Das Lost Core-Verfahren erlaubt es, Salzkern mit hoher mechanischer Festigkeit unter Beibehaltung großer Gestaltungs-

freiheit herzustellen. Allerdings unterliegt dieses auch Einschränkungen. Die verwendete Salzmischung weist eine hohe Erstarrungsschnwindung (ca. 18,5 %) auf, welche die Maßhaltigkeit von größeren Salzkernen negativ beeinflusst. Die Abweichung von der Soll-Geometrie kann bis zu $\pm 0,3\%$ betragen. Diese große geometrische Abweichung kann das Einlegen von Salzkernen erschweren, da bei Übermaß die Salzkern-Lagerstellen stark belastet werden. Diese Belastung und das spröde Verhalten des Salzkerns führen zu dessen

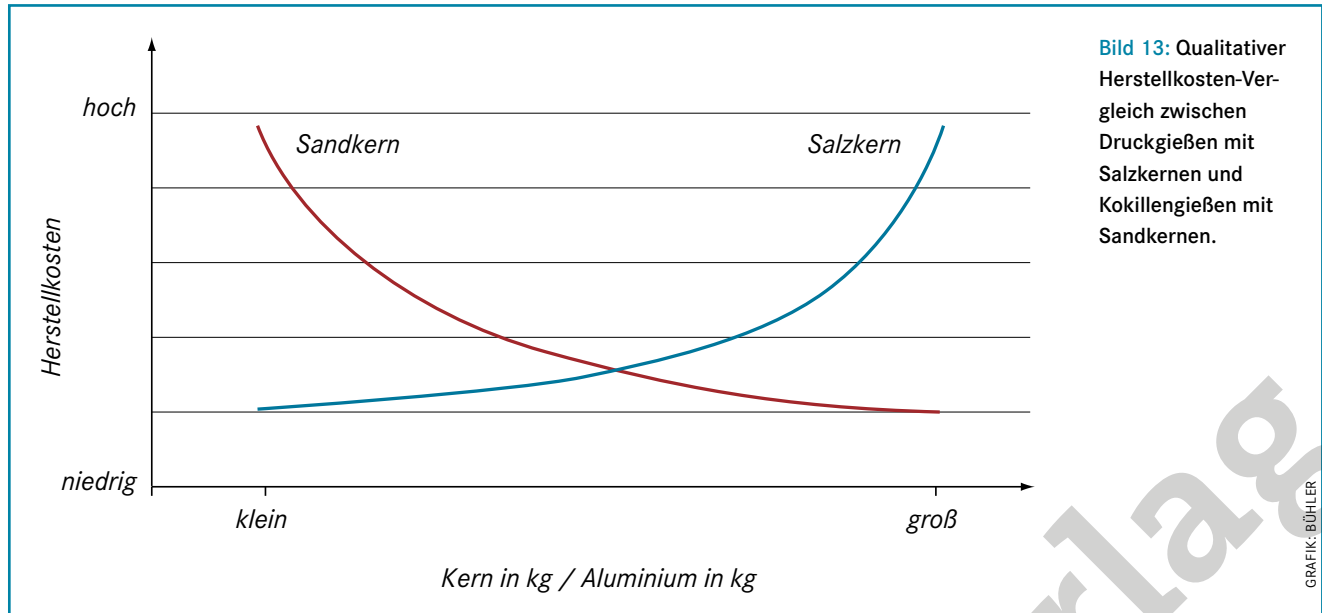


Bild 13: Qualitativer Herstellkosten-Vergleich zwischen Druckgießen mit Salzkernen und Kokillengießen mit Sandkernen.

GRAFIK: BÜHLER

Bruch, noch bevor er mit Aluminium umgossen wird.

Abschließend verlängert die geringe Wärmeleitfähigkeit die Nachdruckphase und somit die Zykluszeit, was insbesondere die Herstellung von dicken Salzkernen (>20 mm) verteuert.

Beurteilung der technischen Machbarkeit

Da die Lost Core-Technologie nur für bestimmte Bauteilgeometrien in Frage kommt, wird in einem ersten Schritt die technische Machbarkeit beurteilt. Für eine erste grobe Beurteilung sind folgende Fragen und Anforderungen zu beachten:

- > Ist der Salzkern an allen Stellen dicker als 6 mm?
- > Ist der Salzkern entformbar? Die Entformungsschräge sollte mindestens 2° betragen.
- > Ist das Dickenverhältnis zwischen benachbarten Teilbereichen des Salzkerns größer als 0,7 (siehe Stelle A in Bild 12)?
- > Der Salzkern soll ohne starke Umlenkungen konzipiert werden, da ansonsten eine große Schwindung in der Form erzeugt wird.
- > Kann der Salzkern so gestaltet werden, dass alle Kerbradien >5 mm sind?
- > Die Lagerung in der Aluminium-Gießform darf nicht überbestimmt sein.
- > Es ist ratsam, mit einfacheren Geometrien zu beginnen.
- > Unter keinen Umständen darf der Ausspülvorgang vernachlässigt werden. Ist die Geometrie auch zum Ausspülen geeignet? Sind Querschnitte, Tiefen und Umlenkungen vorhanden, die diesen Prozess beeinträchtigen?

Darüber hinaus muss der Gießer entsprechende Freiheiten über die Designhöhe des Bauteils haben.

Wirtschaftliche Rentabilität

Bauteile mit Hinterschnitten und komplexen Kanälen werden heutzutage vielfach im Kokillengießverfahren unter Verwendung von Sandkernen gegossen. Dieses Verfahren ist etabliert, wird aber gerade bei großen Bauteilen, die nur einen kleinen Kern benötigen, teuer. Hier kann das Lost Core-Verfahren mit geringeren Kosten überzeugen (Bild 13).

Die Herstellkosten des Salzkerns berechnen sich insbesondere aus den Rohmaterialkosten und der Zykluszeit. Die Salzmischung aus 38 % KCl und 62 % Na₂CO₃ kostet rund 0,35-0,4 Euro/kg (bei Bestellmengen über 20 t). Die Zykluszeit ist bauteilabhängig, in der Regel jedoch länger als beim Aluminiumgießen. Da das Salz die Wärme nur sehr langsam an den Stahl abgibt, verlängert sich vor allem die Nachdruckphase. Für vergleichbare Wanddicken kann die Erstarrungszeit des Salzes das Doppelte gegenüber jener von Aluminium betragen.

Bei der wirtschaftlichen Betrachtung müssen auch noch die Investitionskosten für die Entkernungs- und Wasseraufbereitungsanlage von etwa 500 000 Euro berücksichtigt werden.

Zusammenfassung

Die Möglichkeiten, die Lost Core bietet, sind interessant, allerdings unterliegen sie auch technischen und wirtschaftlichen Grenzen. Um das Lost Core-Verfahren gewinnbringend einzusetzen, bedarf es vor-

ab gründlicher Überlegungen hinsichtlich technischer Machbarkeit und Herstellkosten. Dazu sind umfassendes Grundlagenwissen und eine detaillierte Kenntnis des Prozesses notwendig.

Für erste Abklärungen stellt Bühler sein Wissen und seine Expertise zur Verfügung, damit der Anwender selbstständig die Weiterentwicklung des Prozesses übernehmen kann.

Dipl. Masch.-Ing. (ETHZ) Dario Pierri, Projektleiter Prozessentwicklung, Bühler Druckguss AG, Uzwil, Schweiz, und Christian Beck, Werkzeugmacher und Konstrukteur, Bühler AG, Uzwil, Schweiz.

Literatur:

- [1] *Materials Transactions* 48 (2007), [Nr. 5], S. 1034-1041.
- [2] Janz, G. J.; Allen, C. B.; Bansal, N. P.: *Physical properties data compilations relevant to energy storage. II. Molten salts: Data on single and multi-component salt systems.* NSRDS, April 1979.
- [3] *Europäische Patent EP 2 425 910 A1*, veröffentlicht: 7.3.2012. Applicants: National University Corporation, Tohoku University, Sendai-shi, Miyagi 980-8577 (JP); Yamaha Hatsudoki, Kabashiki Kaisha, Iwata-shi, Shizuoka 438-8501 (JP).