

FOTOS UND GRAFIKEN: VOLKSWAGEN AG

# Schwerkraftkokillengießen mit strukturierten Kokillenoberflächen

Teil 1: Stand der Technik

Strukturierte Kokillenoberflächen können das Fließ- und Formfüllungsvermögen beim Kokillengießen maßgeblich beeinflussen.

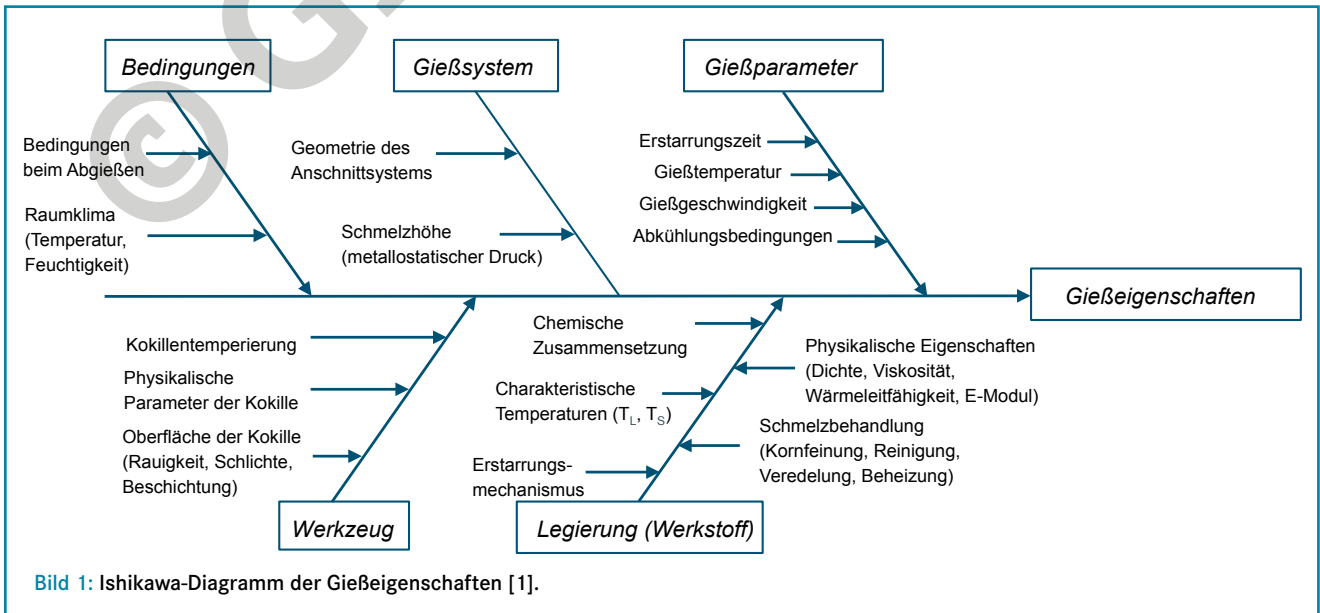


Bild 1: Ishikawa-Diagramm der Gießeigenschaften [1].

Das intensive Bestreben nach Leichtbau regt Ingenieure weltweit zu innovativen Lösungen an. Gussteile werden durch Optimierung der Konstruktion, durch Integration von Funktionen und durch steigendes Verständnis für den Werkstoff sowohl komplexer als auch filigraner. Dieser Trend wird im Schwerkraftkokillengießen durch die Eigenschaften des Verfahrens begrenzt. Die Herstellung von Gussteilen mit Wanddicken  $< 6$  mm stellt unter Großserienbedingungen hohe Anforderungen hinsichtlich eines robusten Prozesses.

Bild 1 zeigt anhand eines Ishikawa-Diagramms die wichtigsten gießtechnologischen Parameter, die die Gießeigenschaften beeinflussen. Einige dieser Parameter sind beispielsweise durch das Gießverfahren oder die Anforderungen an das Bauteil vordefiniert, während andere in Grenzen variiert werden können. Eine Vielzahl wurde bereits für verschiedene Anwendungsfälle untersucht [1]. Aus Bild 1 geht hervor, dass unter anderem das Werkzeug mit den Parametern Temperatur, Schlichte und Werkstoff Einfluss auf die Gießeigenschaften besitzt. Strukturierte Kokillenoberflächen finden beim Kokillengießen Anwendung, um das Fließ- und Formfüllungsvermögen zu verbessern. Die Auswirkungen wurden bisher

## KURZFASSUNG:

Beim Schwerkraftkokillengießen von Aluminiumbauteilen ist neben der Prozessführung, der verwendeten Legierung, der verwendeten Oberflächenschicht und dem Temperaturhaushalt der Kokille auch deren Oberfläche der zentrale Schlüssel für Wirtschaftlichkeit und Qualität der Gussteile.

Um den stetig wachsenden Ansprüchen hinsichtlich des Leichtbaus in Guss gerecht zu werden, müssen neue Optimierungsmöglichkeiten erschlossen und untersucht werden. Ein neuer Ansatz konzentriert sich auf die Oberfläche der Kokille.

Zur Verbesserung des Fließ- und Formfüllungsvermögens von Aluminiumlegierungen wurden Oberflächenstrukturen in dünnwandigen Gussteilbereichen eingesetzt. Zum Nachweis der Wirksamkeit und zur Klärung der Wirkmechanismen wurden nachfolgend Simulationen und Gießversuche durchgeführt. Ein speziell entwickeltes Simulationsmodell verdeutlicht den Einfluss von Oberflächenstrukturen im Formfüllprozess. Für die Gießversuche im Labormaßstab wurde eine Kokille entwickelt, die es ermöglicht, die bekannten Strukturen und Prozessparameter zu analysieren. Zur Bewertung der Wirksamkeit wurde die Messgröße Fließlänge genutzt. Zur Klärung der Wirkmechanismen wurden u. a. DAS-Messungen (Dendritenarmabstand) herangezogen.

Dieser Teil einer Veröffentlichungsreihe gibt den Stand der Technik auf der Basis der serienmäßigen Oberflächenstrukturen wieder und schafft die Grundlage für nachfolgende Veröffentlichungen.

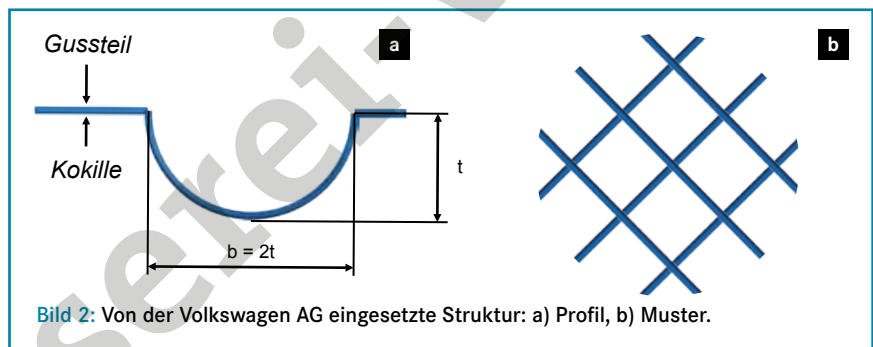


Bild 2: Von der Volkswagen AG eingesetzte Struktur: a) Profil, b) Muster.



Bild 3: a) Hilfsrahmen der Volkswagen AG, b) Detailansicht.

noch nicht hinreichend wissenschaftlich untersucht.

Die von der Volkswagen AG verwendete Struktur ist in Bild 2 schematisch dargestellt. Die Bilder 3 und 4 zeigen jeweils ein Gussteil der Volkswagen AG und der AUDI AG, deren Oberflächen auf strukturierte Kokillen zurückzuführen sind. Betrachtet man Gussteile im Marktumfeld, findet man ebenfalls vergleichbare erhabene Strukturen auf den Gussteiloberflächen. Die Betrachtung der Gussteile zeigt,

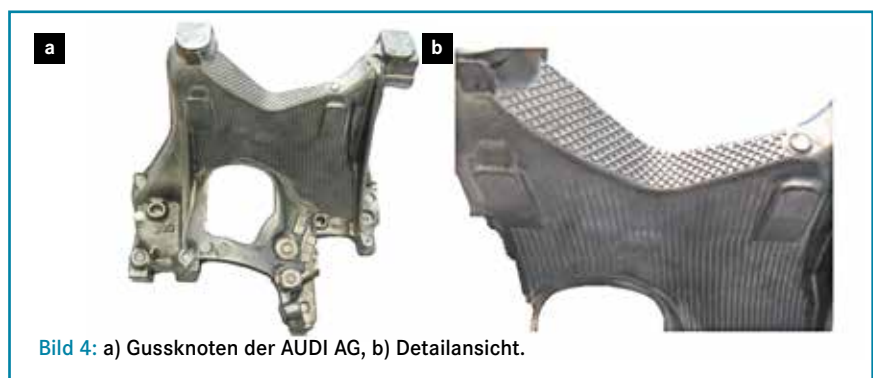
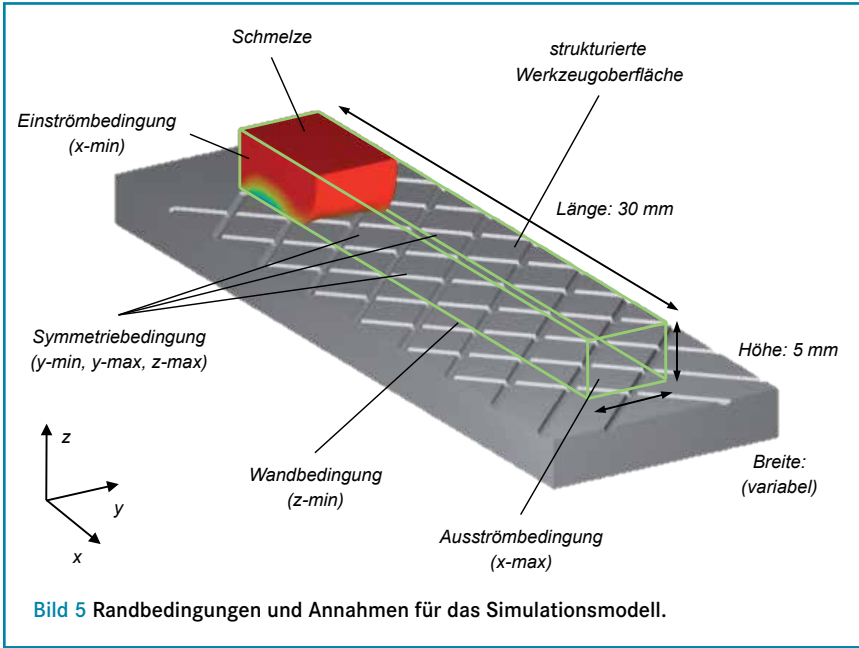


Bild 4: a) Gussknoten der Audi AG, b) Detailansicht.

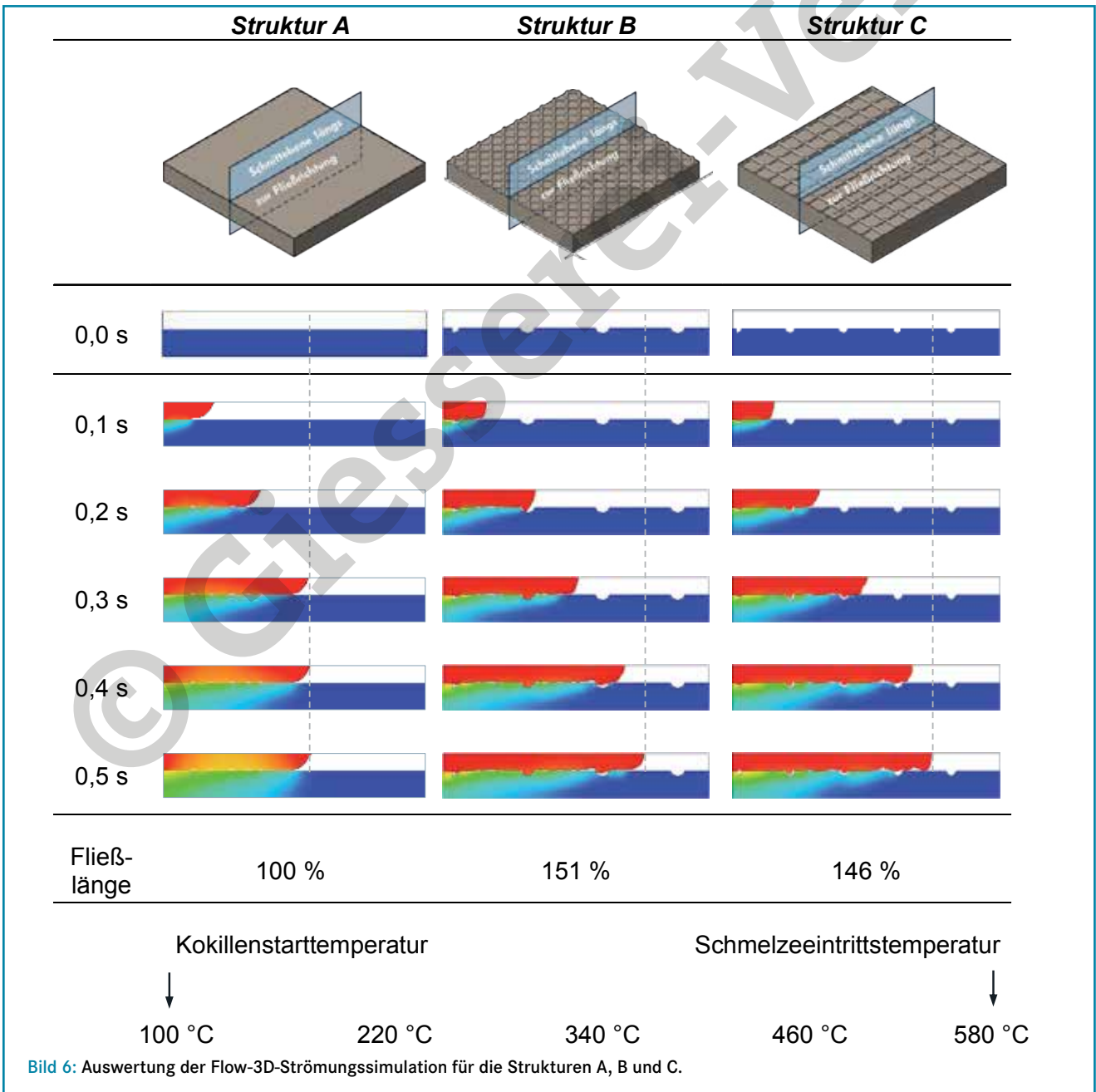


dass strukturierte Kokillenoberflächen u. a. in dünnwandigen Gussteilbereichen eingesetzt werden, z. B. in Hilfsrahmen und Gussknoten. Funktion, exakte Geometrie und Herstellungsverfahren sind im Stand der Technik nicht dokumentiert. Umgangssprachlich wird häufig von Waffelmustern gesprochen.

Den Untersuchungsschwerpunkt dieser Veröffentlichung bildet die Ermittlung des Fließ- und Formfüllungsverhaltens einer Aluminiumschmelze in Abhängigkeit von der serienmäßig bekannten Oberflächenstrukturierung.

**Simulation**

Für die numerischen Untersuchungen wurde ein Simulationsmodell mit der Software Flow-3D entwickelt. Dieses soll die Bewertung der Fließlänge in Abhängigkeit von



der Oberflächenstruktur ermöglichen. Das Modell mit definierten Randbedingungen und Annahmen ist in **Bild 5** dargestellt. Hierbei strömt die Schmelze von x-min nach x-max. Die maximal mögliche Fließlänge beträgt 30 mm. Um die zu untersuchende Oberflächenstruktur mindestens einmal vollständig abzubilden, kann die Breite des Simulationsmodelles angepasst werden. Die Höhe des Berechnungsmodells beträgt insgesamt 5 mm, wobei 3 mm Schmelze und 2 mm Kokille berücksichtigt werden. Symmetriebedingungen wie (y-min, y-max, z-max) begrenzen das Modell. Durch die Symmetriebedingung z-max wird die untersuchte Struktur sowohl unten als auch oben berücksichtigt. Z-min ist als Wandbedingung definiert. Geringe Schmelze- und Kokillentemperaturen sowie Strömungsgeschwindigkeiten gewährleisten ein Erstarren der Schmelze innerhalb des Berechnungsgebietes. Die Simulation berücksichtigt folgende physikalische Berechnungsmodelle: Schwerkraft, Wärmeübergang, Erstarrung, Oberflächenspannung, Turbulenz und Viskosität. **Bild 6** zeigt ausgewählte Ergebnisse der Strömungssimulationen der serienmäßigen Strukturen. Hierzu zählen Struktur A (glatt) Struktur B (Anströmwinkel 45°) und Struktur C (Anströmwinkel 0°). Der Anströmwinkel bezieht sich dabei auf die Strömungsrichtung der Schmelze. Farblich dargestellt sind Schmelze- und Kokillentemperatur zu jeweils diskreten Zeitschrittweiten. Es ist zu erkennen, dass bei Struktur A die Schmelze über die gesamte Fließlänge nahezu stetigen Kontakt mit der Kokillenoberfläche besitzt, nach ca. 0,3 s erstarrt und zum Stehen kommt. Die erreichte Fließlänge entspricht 100 %. Bei den Strukturen B und C erkennt man, dass sich zwischen Schmelze und Kokillenoberfläche Spalten bilden und die Struktur nicht vollständig abgebildet wird. Die ermittelten Fließlängen betragen, bezogen auf Struktur A, 151 % (Struktur B) und 146 % (Struktur C).

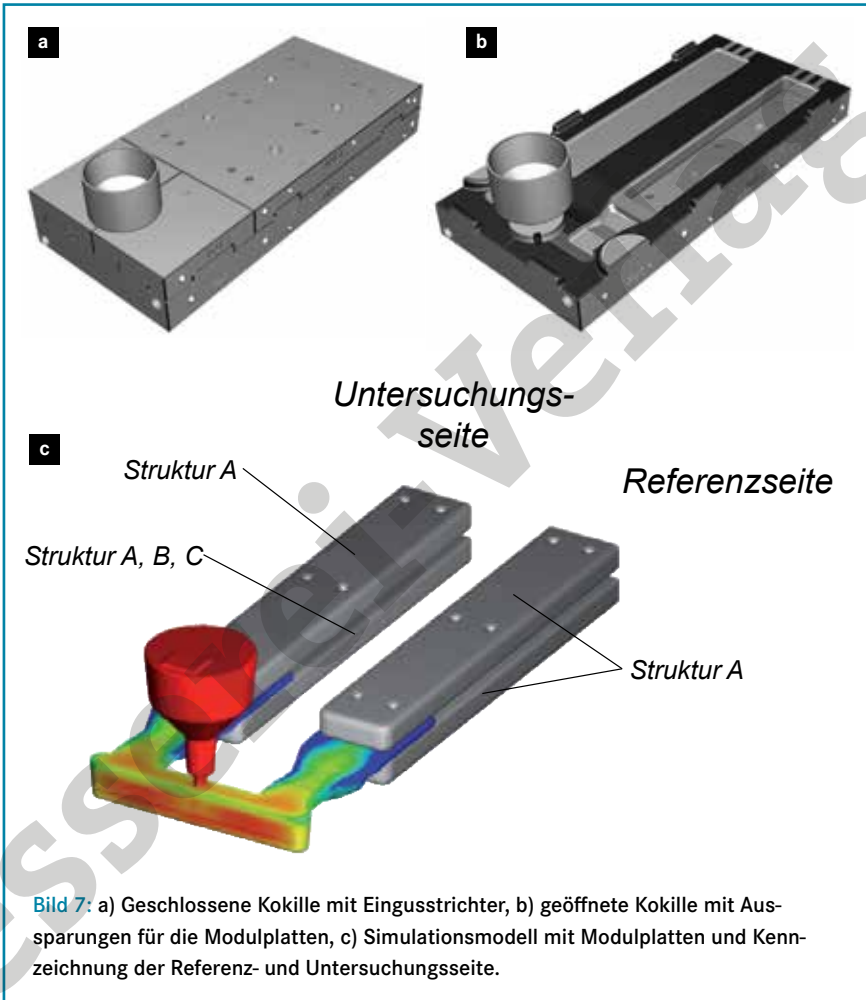
**Experimentelle Untersuchungen**

Um den Einfluss von Oberflächenstrukturen auf das Fließ- und Formfüllungsvermögen experimentell zu untersuchen, wurde eine Kokille (**Bild 7**) entwickelt und angefertigt. An diese wurden folgende Anforderungen gestellt:

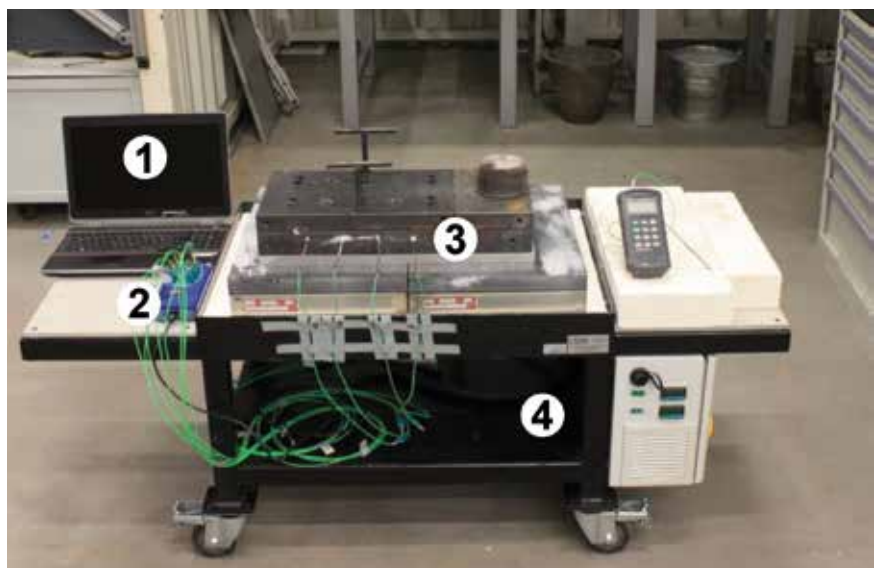
- > Realisierung geringer Strömungsgeschwindigkeiten in einem breiten, dünnwandigen Gießkanal bei horizontalem Formfüllen,
- > direkter Vergleich zwischen strukturierter und unstrukturierter Kokillenoberfläche und
- > Variabilität einsetzbarer Oberflächen.

**Tabelle 1: Randbedingungen der Gießversuche im Labor.**

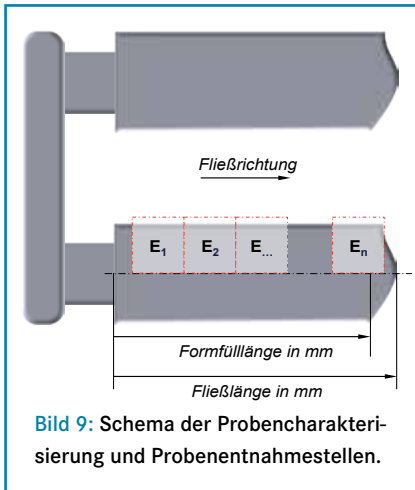
Parameter	Beschreibung
Legierung	AlSiMg (primär naheutektisch)
Aufschmelzen	SiC-Tiegel im Kammerofen
Schmelzebehandlung	ohne
Schlichte	ohne
Kokillentemperatur	350 ±5 °C
Gießtemperatur	780 ±2 °C



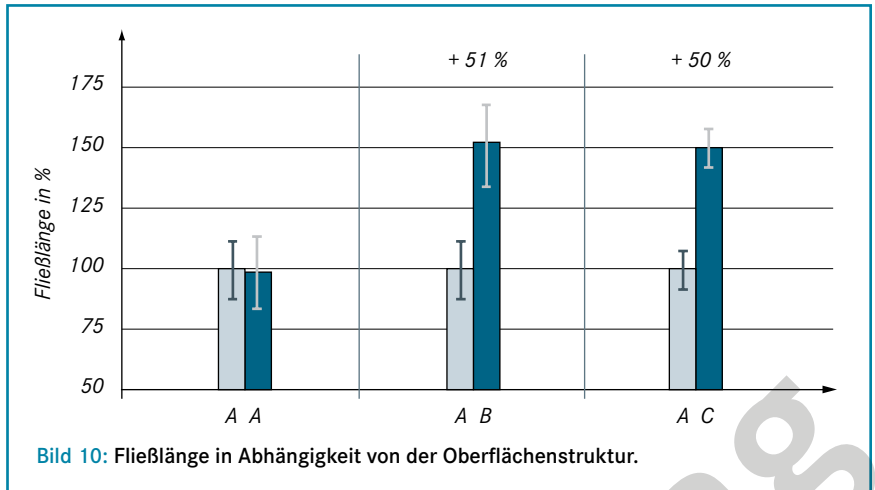
**Bild 7:** a) Geschlossene Kokille mit Eingusstrichter, b) geöffnete Kokille mit Aussparungen für die Modulplatten, c) Simulationsmodell mit Modulplatten und Kennzeichnung der Referenz- und Untersuchungsseite.



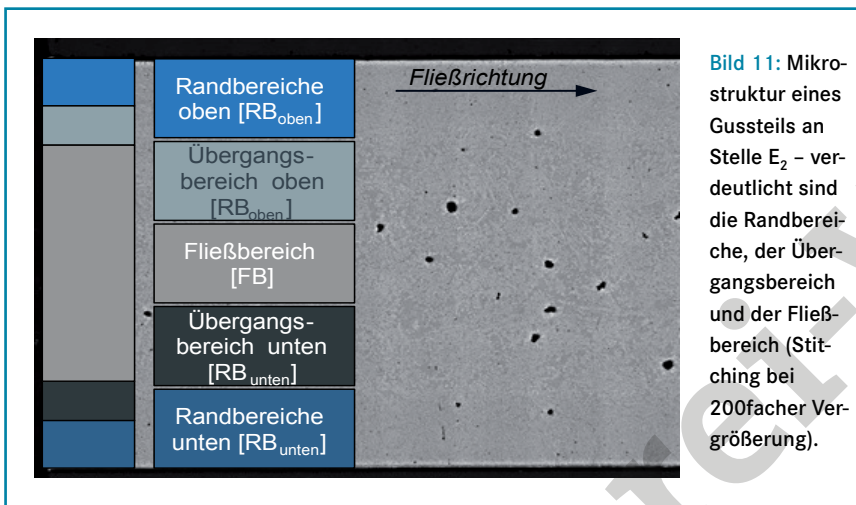
**Bild 8:** Versuchsaufbau: (1) Laptop mit entsprechender Software, (2) TC-08-Datenlogger, (3) modulare Kokille, (4) Metal Health Centre.



**Bild 9:** Schema der Probencharakterisierung und Probenentnahmestellen.



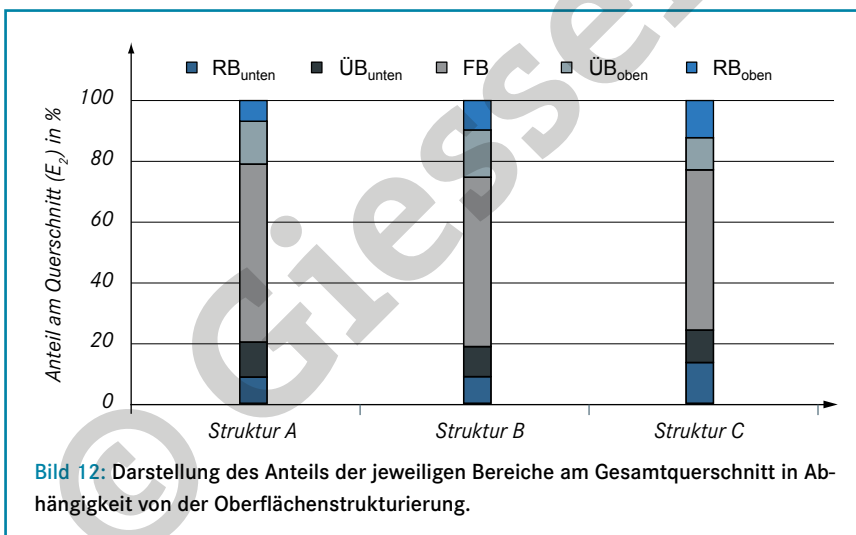
**Bild 10:** Fließlänge in Abhängigkeit von der Oberflächenstruktur.



**Bild 11:** Mikrostruktur eines Gussteils an Stelle  $E_2$  – verdeutlicht sind die Randbereiche, der Übergangsbereich und der Fließbereich (Stitching bei 200facher Vergrößerung).

Oberseite sowie der Referenzseite wird stets durch Struktur A (glatt) gebildet (Bild 7c). Je Strukturkombination (A – A; A – B; A – C) wurden sechs Gussteile hergestellt. Die makroskopischen Analysen wurden an jedem, die der metallografischen Analysen an mindestens zwei Gussteilen durchgeführt (Bild 9).

Bild 10 zeigt die ermittelten Fließlängen der Gussteile aus Referenzseite (jeweils linker Balken) und Untersuchungsseite (rechts) in Abhängigkeit von der verwendeten Struktur. Die Referenzlänge der Struktur A ist bei linkem und rechtem Gussteil vergleichbar und beträgt ca. 77 mm bzw. 100 %. Die Mittelwerte der Fließlänge von Struktur A liegen für alle Gießversuche stets auf gleichem Niveau. Demnach ergibt sich bei unterschiedlichen Oberflächenstrukturen (A, B, C) bei der Untersuchungsseite keine signifikante Änderung der Fließlänge von Struktur A auf der Referenzseite. Wird in der Kokille auf der Untersuchungsseite Struktur A durch B oder C ersetzt, steigt die Fließlänge signifikant an. Die Steigerung der Mittelwerte für die Strukturen B und C betragen +50 % bzw. +51 %. Die Abweichung bei Struktur B ( $\pm 17$  %) ist dabei größer als bei Struktur C ( $\pm 8$  %).



**Bild 12:** Darstellung des Anteils der jeweiligen Bereiche am Gesamtquerschnitt in Abhängigkeit von der Oberflächenstrukturierung.

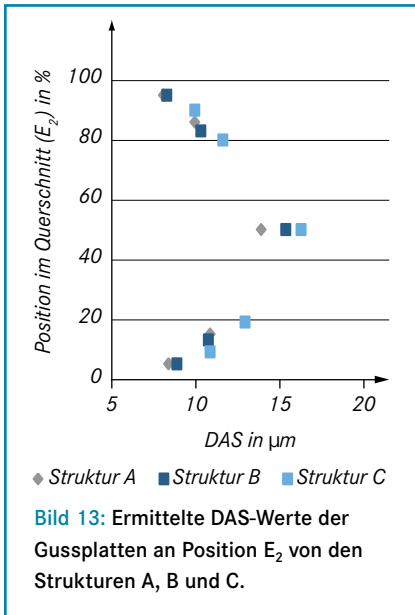
Die Kokille ermöglicht bei jedem Abguss den direkten Vergleich der Gussteile aus der rechten und linken Kavität. Die rechte Kavität wird als Referenzseite und die linke als Untersuchungsseite genutzt. Als Bewertungskriterien können Fließlänge, Formfülllänge, Gussteilvolumen und -masse, die Mikrostruktur der Gussteile und die Temperatur-Zeit-Verläufe der Kokille herangezogen werden. Bild 8 zeigt den zugehörigen Versuchsstand mit entsprechender Peripherie.

### Versuchsdurchführung und Auswertung

Tabelle 1 stellt ausgewählte Randbedingungen der experimentellen Untersuchungen dar. Um die Gießversuche den durchgeführten Simulationen anzunähern, wurden die Versuche ohne Schlichte durchgeführt. Im Gegensatz zur Simulation wurde jedoch nur der Einfluss der Strukturierung (Struktur A, B, C) auf der Unterseite untersucht. Die Struktur der

### Mikrostrukturelle Analyse

Die Analyse der Mikrostruktur des Gussteils trägt dazu bei, die Wirkmechanismen der Fließlängensteigerung zu verstehen. Die Schlitze  $E_1$  bis  $E_n$  werden lt. Bild 9 entnommen. Die Schlifflage ist parallel zur Fließrichtung, ermittelt werden die DAS-Kennwerte und die Dicken des Rand-, Übergangs- und des Fließbereiches. Diese verschiedenen Bereiche beschreiben ein Phänomen, das durch die Erstarrungskinetik in Verbindung mit der Oberflächenstrukturierung hervorgerufen wird. Charakterisiert wird das lokale, wegabhängige Gefüge in Strömungsrichtung. Bild 11 zeigt die Mikrostruktur eines



**Bild 13:** Ermittelte DAS-Werte der Gussplatten an Position E<sub>2</sub> von den Strukturen A, B und C.

Gussteils mit der Struktur A. Zu erkennen sind über die Probe symmetrisch verteilte Rand- und Übergangsbereiche sowie der Fließbereich. Diese können wie folgt charakterisiert werden:

- > Randbereich: dichtes Gefüge, geringer DAS (<12 µm), kaum Porosität, gerichtete Erstarrung vom Rand zur Mitte;
- > Übergangsbereich: Mischgefüge aus Rand- und Fließbereich;

- > Fließbereich: aufgelockertes Gefüge, erhöhter DAS (>12 µm), hohe Porosität, kein Anteil gerichteter Erstarrung, hoher Anteil an eutektischen Zellen.

**Bild 12** stellt die Ausbildung der drei Bereiche im Gussteil in Abhängigkeit von den untersuchten Oberflächenstrukturen gegenüber. Es kann jeweils eine deutliche Ausprägung des Rand-, Übergangs- und des Fließbereiches definiert werden. Vergleicht man die Verteilungen, so fällt auf, dass die prozentualen Anteile der Bereiche sowohl an der strukturierten Unterseite als auch an der unstrukturierten Kokillenoberseite variieren. Struktur A zeigt eine symmetrische Verteilung der Bereiche. Rand- und Übergangsbereiche von Struktur B weisen hingegen geringere, Struktur C größere Anteile an der Kokillenoberseite auf.

**Bild 13** verdeutlicht, dass der DAS in der Mitte bei den Strukturen B und C im Mittel im Vergleich zu Struktur A um ca. 2 µm länger ist. Der DAS ist bei den Strukturen A und B in den Rand- und Übergangsbereichen nahezu identisch, was auf gleiche Erstarrungsgeschwindigkeiten zurückzuführen ist. Struktur C zeigt im oberen und unteren Bereich erhöhte DAS-Werte.

**Diskussion**

Mit Hilfe von Simulationen und Gießversuchen wurden die Strukturen A, B und C untersucht. Dabei wurden bei beiden Untersuchungsmethoden prozentual ähnliche Fließlängen erreicht. Die Gießversuche erfolgten unter Verwendung einer einseitigen Strukturierung. Unter der Annahme, dass eine beidseitige Strukturierung zu einer weiteren Steigerung der Fließlänge führen würde, zeigt die Simulation einen zu geringen Wert für die Fließlänge. Als Grund für die Abweichung können die Randbedingungen und Vereinfachungen des Simulationsmodells genannt werden. Beispielsweise hat der definierte Wärmeübergangskoeffizient einen signifikanten Einfluss. In der Simulation wurde erkannt, dass die Schmelze teilweise nicht in der Lage ist, die Oberflächenstrukturen vollständig abzubilden. Dieser Effekt konnte durch metallografische Analysen der Gussteile bestätigt werden. Dies könnte von der Oberflächenspannung sowie den Prozessparametern (Geschwindigkeit und metallostatistischer Druck der Schmelze) abhängen. Vor allem bei Struktur C ist der Unterschied zwischen realer und abgebildeter Kanalhöhe ausgeprägt. In den nicht abgebildeten Strukturen sammelt sich Luft, die thermisch isolierend

wirken könnte. Das Resultat sind erhöhte DAS und gesteigerte Fließlängen. Struktur B weist nur einen leicht erhöhten DAS in der Mitte der Gussteile auf. An den Rändern ist der DAS nahezu identisch zu Struktur A. Eine Fließlängensteigerung allein durch thermische Isolation der Schmelze ist daher nicht realistisch. Eine mögliche Erklärung könnte die Beeinflussung der Oxidhaut auf der Schmelzoberfläche sein. Durch die Anströmung der Struktur unter 45 ° ist die Häufigkeit der Berührung der Schmelzefront in Strömungsrichtung mit den Strukturkanten höher als bei Struktur C. Dies könnte zu kontinuierlichem Aufreißen oder zur Verklammerung der Oxidhaut führen. Während in der Simulation eine Orientierungsabhängigkeit der Struktur zu beobachten ist, ist diese im Realversuch eher an der Streuung zu erkennen. Festzuhalten ist, dass mittels der Oberflächenstrukturen eine signifikante Beeinflussung des Formfüllvorgangs erfolgt und deren vielfältiger Einsatz bei diversen Bauteilen ihre Berechtigung hat.

### Zusammenfassung

Strukturierte Kokillenoberflächen in formfüllungskritischen Bereichen können zum Stand der Technik gezählt werden. Die Wir-

kungsweise derartiger Oberflächenstrukturierungen wurde bislang nicht systematisch untersucht. Für die durchgeführten Untersuchungen wurden ein vereinfachtes Simulationsmodell angewendet sowie eine geeignete Kokille entwickelt, angefertigt und erprobt. Es wurden drei serienmäßige Strukturen durch Simulationen und Gießversuche erfasst und hinsichtlich der Fließlänge bewertet. Die Realversuche als auch die Simulation zeigen bei den Strukturen B und C gegenüber Struktur A eine Steigerung der Fließlänge von bis zu 51 %. Damit stützen die durchgeführten Gießversuche die Simulationsergebnisse, zeigen jedoch auch den Handlungsbedarf bei der Weiterentwicklung des Simulationsmodells auf. Durch umfangreiche metallografische Analysen konnten erste Ansätze für die Wirkmechanismen, wie das Abbildungsverhalten von Strukturen, der daraus resultierende Wärmeübergang sowie die Möglichkeit des Aufreißen der Oxidhaut, identifiziert werden.

Es wird deutlich, dass die Wirkungsweise von strukturierten Oberflächen ein komplexes Themengebiet ist. Der Einsatz der serienmäßigen Strukturen scheint gerechtfertigt zu sein, da durch diese eine signifikante Fließlängensteigerung erreicht und somit ein Beitrag zu Prozessstabilität

und Leichtbau geleistet werden kann. In weiterführenden Simulationen und Gießversuchen werden weitere Strukturen und Parameter untersucht, um die Wirkmechanismen zu verstehen und das Potenzial zur Waddickenreduzierung (Leichtbau) zu erschließen.

*Die Untersuchungen entstanden in enger Zusammenarbeit der Fachbereiche Konzernforschung Wolfsburg, der Entwicklung Achsen, Geschäftsfeld Fahrwerk, dem Komponenten-Werkzeugbau und dem Leichtmetallzentrum aus Braunschweig. Besonderer Dank gilt den beteiligten Kollegen sowie R. Kucharski, Fa. Arkentec, für die gute Zusammenarbeit. Des Weiteren sei der TU Bergakademie Freiberg, der RWTH Aachen sowie der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg für die Betreuung gedankt. Herzlicher Dank gilt Prof. i.R. Dr.-Ing. K. Eigenfeld, Prof. Dr.-Ing. A. Bührig-Polaczek und Prof. Dr.-Ing. R. Bähr. M.Sc. Stephan Knorr, Dipl.-Ing. Sebastian Gierth, Dr.-Ing. Sebastian Findeisen und Dipl.-Ing. Thomas Beganovic, Volkswagen AG, Braunschweig*

### Literatur:

[1] Polianska, O.: *Technologische Erfordernisse beim Aluminium-Dünnwand-Kokillengießen*. Diss., Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2010.

