

Modulare Versuchskokille mit eingelegtem Gussteil: links – konventionell (Waffelmuster), rechts – innovativ (bionische Struktur).

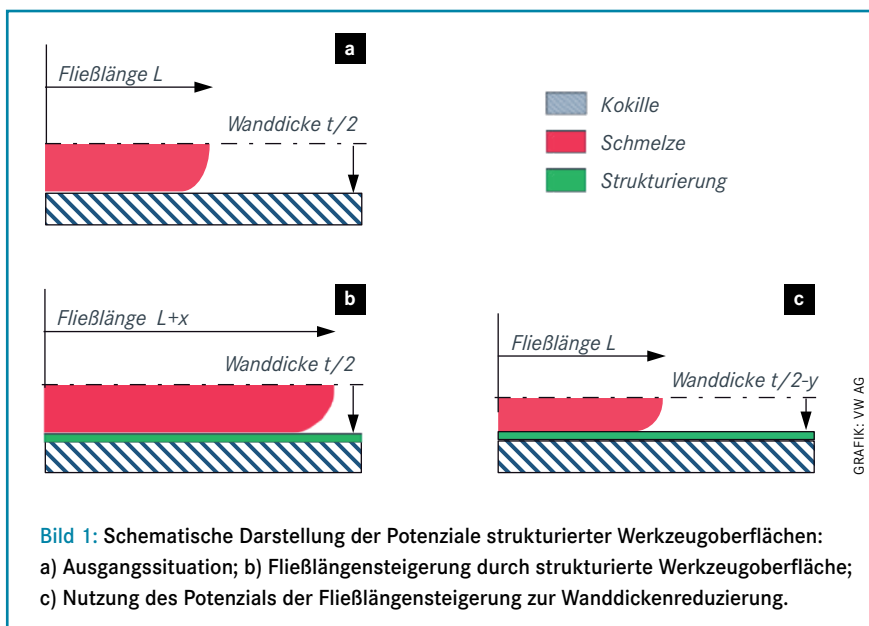
FOTO: VW AG

# Schwerkraftkokillengießen mit strukturierten Kokillenoberflächen

Teil 2\*: Innovative Strukturen

VON SEBASTIAN GIERTH, STEPHAN KNORR, THOMAS BEGANOVIC UND SEBASTIAN FINDEISEN, WOLFSBURG / BRAUNSCHWEIG

Themen wie die Digitalisierung, das automatisierte bzw. autonome Fahren oder die Elektrifizierung des Antriebsstrangs stehen derzeit im Fokus der Automobilindustrie. Neben diesen Aspekten ist nach wie vor auch der Leichtbau eines der zentralen Themen im Automobilbau, da die Massen der zusätzlichen Komponenten (z. B. Batterie-, Infotainmentsysteme, Komfortpakete) kompensiert werden müssen. Die Massen der Karosserie-, Aggregat- und Fahrwerksteile konnten in den vergangenen Jahren durch verschiedenste Konstruktions-, Prozess- und Legierungsmaßnahmen reduziert werden.



GRAFIK: VW AG

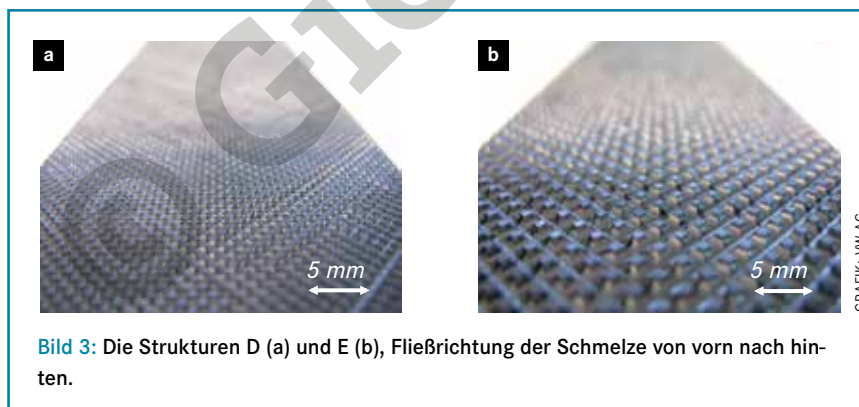
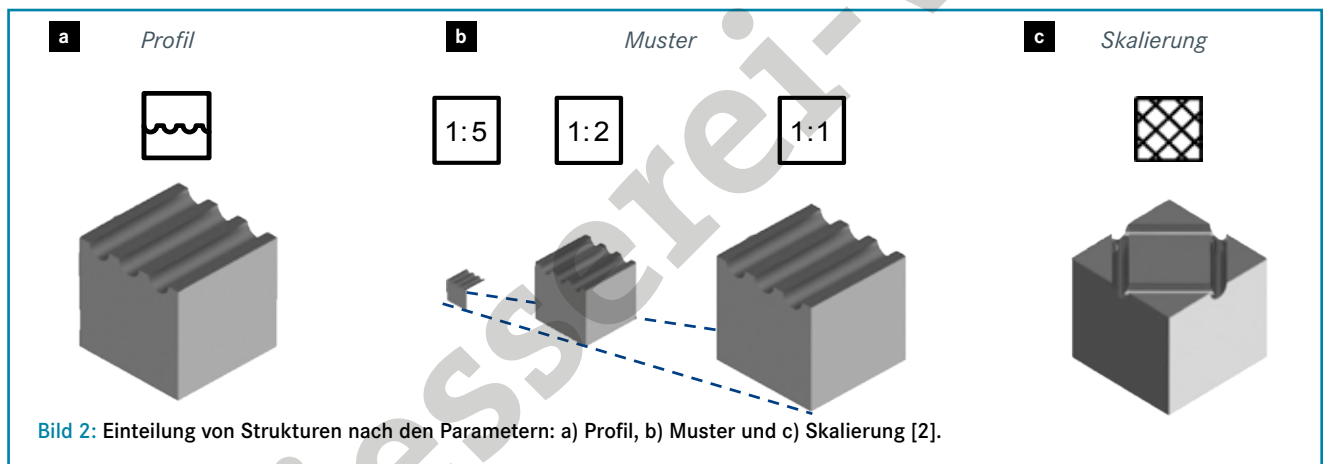
Auch die Gießerei-Industrie investiert in neue Technologien, um den Forderungen nach hochfesten, gewichtsreduzierten Bauteilen gerecht zu werden. Durch die Verbesserung der mechanischen Eigenschaften der Legierungen könnten Bauteile bei gleicher Belastung dünnwandiger ausgelegt werden, um das Gewicht zu senken. Aktuell können unter Großserienbedingungen im Schwerkraftkokillengießverfahren Wanddicken von ca. 5 mm prozesssicher hergestellt werden. Eine Verringerung der Wanddicken auf < 5 mm würde zu Gussfehlern im Prozess in Form von Kaltlauf führen. Um Wanddicken von 5 mm herstellen zu können, werden neben naheutektischen AlSi-Legierungen, stark isolierenden Schichten sowie hohen Gieß- und Kokillentemperaturen sogenannte Waffelmuster in die Kokillenoberfläche eingebracht. Diese Waffelmuster wirken sich positiv auf das Fließverhalten von Al-Legierungen aus [1, 2].

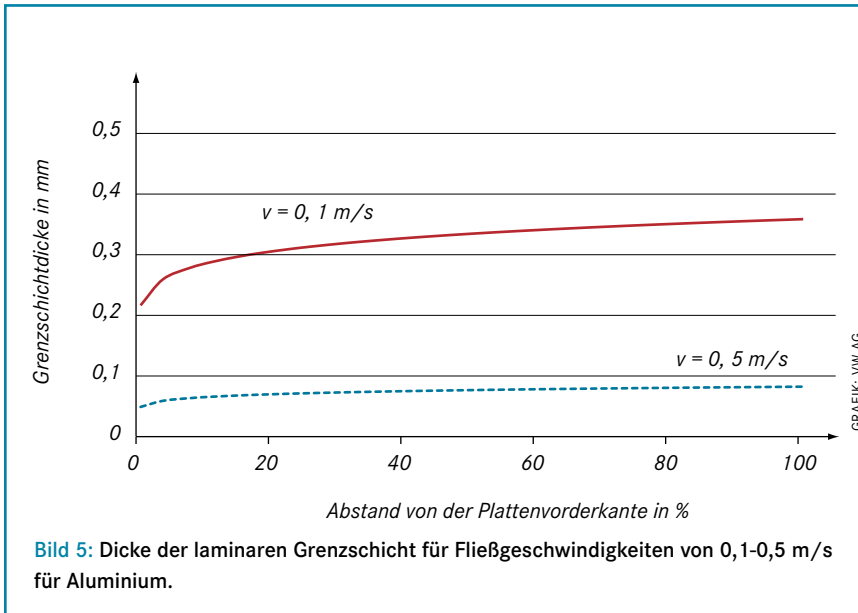
In der vorangegangenen Veröffentlichung [1] konnte gezeigt werden, dass

## KURZFASSUNG:

Das Leichtbaupotenzial moderner Schwerkraftkokillenguss-Bauteile wird durch die minimal gießbaren Wanddicken beschränkt. Hierfür ist unter anderem das Fließvermögen der verwendeten Legierungen maßgebend. Der Einsatz von sogenannten Waffelmustern auf den Kokillenoberflächen in dünnwandigen und kaltlaufgefährdeten Gussteilbereichen ist Stand der Technik. Die Wirksamkeit dieser Strukturen wurde bereits durch die Autoren dieses Beitrages untersucht und bestätigt. Es zeigte sich, dass eine signifikante Fließlängensteigerung gegenüber unstrukturierten Oberflächen erreicht werden kann [1]. Aufbauend auf dieser Erkenntnis wurden neue Strukturen entwickelt und experimentell im Labormaßstab erprobt. Ziel ist es, eine weitere Steigerung der Fließlänge gegenüber den Standardstrukturen zu erreichen. Weiterhin soll die Fließlänge bei reduzierten Wanddicken in Abhängigkeit von der Strukturierung untersucht werden. Die Charakterisierung der Gussteile erfolgt makroskopisch anhand der Fließ- und Formfülllänge und mikroskopisch durch Analyse der Dendritenarmabstände (DAS) und der erstarrungsbedingten Schichtverteilung im Gussteilquerschnitt. Die daraus gewonnenen Kennwerte dienen dazu, ein Verständnis für die Wirksamkeit von Oberflächenstrukturen zu entwickeln.

Durch die Verwendung der entwickelten Strukturen wurden die Fließlängen im Vergleich zum Standard-Waffelmuster nochmals signifikant gesteigert. Weiterhin wurde durch den Einsatz der bionischen Struktur K eine Wanddickenreduzierung von ca. 35 % ohne Verlust der Fließlänge gegenüber der unstrukturierten Oberfläche erzielt.





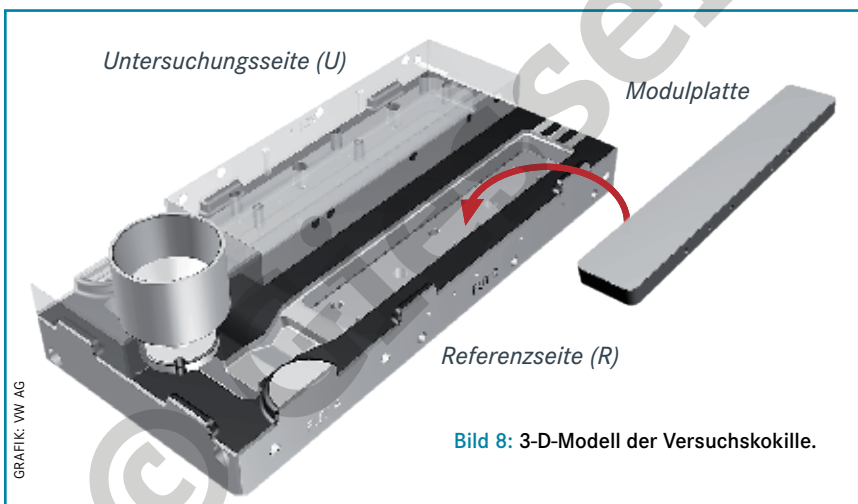
**Bild 5:** Dicke der laminaren Grenzschicht für Fließgeschwindigkeiten von 0,1-0,5 m/s für Aluminium.



**Bild 6:** Technische Rillenstruktur.



**Bild 7:** Ableitung der Haifischhaut-Struktur von schnellschwimmenden Haien [3].



**Bild 8:** 3-D-Modell der Versuchskokille.



**Bild 9:** Versuchsaufbau: 1 – Laptop mit entsprechender Software, 2 – TC-08-Datenlogger, 3 – Versuchskokille, 4 – MetalHealthCentre.

die Standardstrukturen (B, C) die Fließlänge bei schlichtefreier Anwendung im Vergleich zu einer unbearbeiteten Oberfläche (Struktur A) um bis zu 50 % steigern können.

Ziel der hier beschriebenen Untersuchungen ist es, durch eine Weiterentwicklung bisher bekannter und die Entwicklung bionischer Strukturen die Fließlängen nochmals deutlich zu steigern. Das damit generierte Potenzial soll eine Reduzierung der Wanddicke ermöglichen (**Bild 1**).

**Entwicklung neuer Strukturen**

Die Entwicklung geeigneter Strukturen für das Schwerkraftkokillengießen kann durch die Einführung geometrischer Parameter systematisiert erfolgen. Hierfür werden die Parameter Profil, Skalierung und Muster (**Bild 2**) sowie der Begriff Elementarzelle eingeführt. Die Elementarzelle beschreibt – ähnlich wie beim Aufbau von Kristallgittern – das kleinste wiederkehrende Element der Struktur. Durch die beliebige Anordnung von Elementarzellen können verschiedene Muster erzeugt werden. Durch diese Systematisierung wurden mehr als 100 Strukturen entwickelt. Nachfolgend werden fünf ausgewählte Strukturen vorgestellt. Die Bezeichnung der Strukturen wird, ausgehend von der vorangegangenen Veröffentlichung [1], alphabetisch fortgesetzt. Für alle Strukturen gilt, dass durch die Bearbeitung der Modulplatten stets die Rauheit der Oberflächen und die Wanddicke des hergestellten Gussteils beeinflusst werden.

**Strukturen D und E**

Die Strukturen D und E werden durch Skalierung der Standardstruktur B aus [1] erzeugt (**Bild 3**). Hierzu wird für die Struktur D der Fräslinienabstand der Standardstruktur B um den Faktor 4 verkleinert. Das Resultat ist eine Oberflächenstrukturierung mit geringer Tiefe. Die Struktur E wird mit einem Fräslinienabstand hergestellt, der gegenüber der Standardstruktur um den Faktor 2 kleiner ist. Die Tiefe ist doppelt so groß wie bei Struktur D.

**Struktur F**

Die Oberfläche des Blattes einer Lotus-pflanze weist eine hierarchische Dreifachstruktur auf. Die grobe Primärstruktur (10 bis 50 µm) wird von einer sekundären Feinstruktur (0,2 bis 5 µm) und einer anschließenden tertiären Wachsschicht überlagert [3]. Aus dieser Mikro- und Nanostruktur resultiert eine Superhydrophobie, die zu hervorragenden Selbstreinigungseffekten führt. Die Superhydrophobie verhindert die Benetzung der Oberfläche mit

Wasser, da die feinen Nanostrukturen eine energetisch ungünstige Oberflächenvergrößerung der Wassertropfen bewirken [4] (Bild 4).

Der Effekt der Nichtbenetzung könnte auch beim Kontakt zwischen Stahl und Aluminiumschmelze funktionieren. Bei Kontaktwinkeln nahe 180° könnten zudem Reibungswiderstände zwischen Schmelze und Kokillenoberfläche verringert werden, wodurch die Schmelze höhere Fließwege erreichen würde. Für die Herstellung der lotusähnlichen Struktur F wird das thermische Abtragen eingesetzt.

### Struktur H

Rillenstrukturen können unter anderem die Strömung von Fluiden positiv beeinflussen, indem vor allem Querströmungen reduziert werden [5-7]. Als Richtwerte für die Auslegung der Rillenstruktur auf die Strömungsbedingungen der eingesetzten Versuchskokille wurden die folgenden Gleichungen zur Berechnung der viskosen Unterschicht [6] und der Ableitung der Strukturparameter S (Strukturspitzenabstand) und H (Höhe der Strukturspitzen) für Rillen [8] verwendet:

$$\delta_T = 5 \cdot \frac{\nu}{\sqrt{\tau_w/\rho}} \approx 30 \cdot \left(\frac{\nu}{v}\right)^{9/10} \cdot x^{1/10} \quad (1)$$

- $\delta_T$  Dicke der viskosen Unterschicht
- $\nu$  kinematische Viskosität
- $\tau_w$  Wandschubspannung
- $\rho$  Dichte
- $v$  Fließgeschwindigkeit des Fluids
- $x$  Abstand von der angeströmten Plattenvorderkante

$$S = 3,5 \cdot \delta_T \quad (2)$$

$$H = \frac{S}{2} \quad (3)$$

Für die Berechnung der viskosen Unterschicht wurden die kinematische Viskosität der Schmelze für Aluminium mit  $4,2 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ , die Fließgeschwindigkeit in der Kavität laut Simulation mit 80 mm/s sowie der Abstand  $x$  in Fließrichtung mit  $0 < x < 100 \%$  gewählt. Die berechneten Werte für die Dicke der viskosen Unterschicht sind in Bild 5 für geringe ( $v_1$ ) und erhöhte ( $v_2$ ) Fließgeschwindigkeiten dargestellt.

Mit Gleichung (2) zur Auslegung von Rillenstrukturen erhält man den von der Fließlänge abhängigen Abstand der Strukturspitzen zueinander. Das theoretische Optimum ist somit eine Struktur, deren Spitzenabstand mit zunehmenden Fließ-

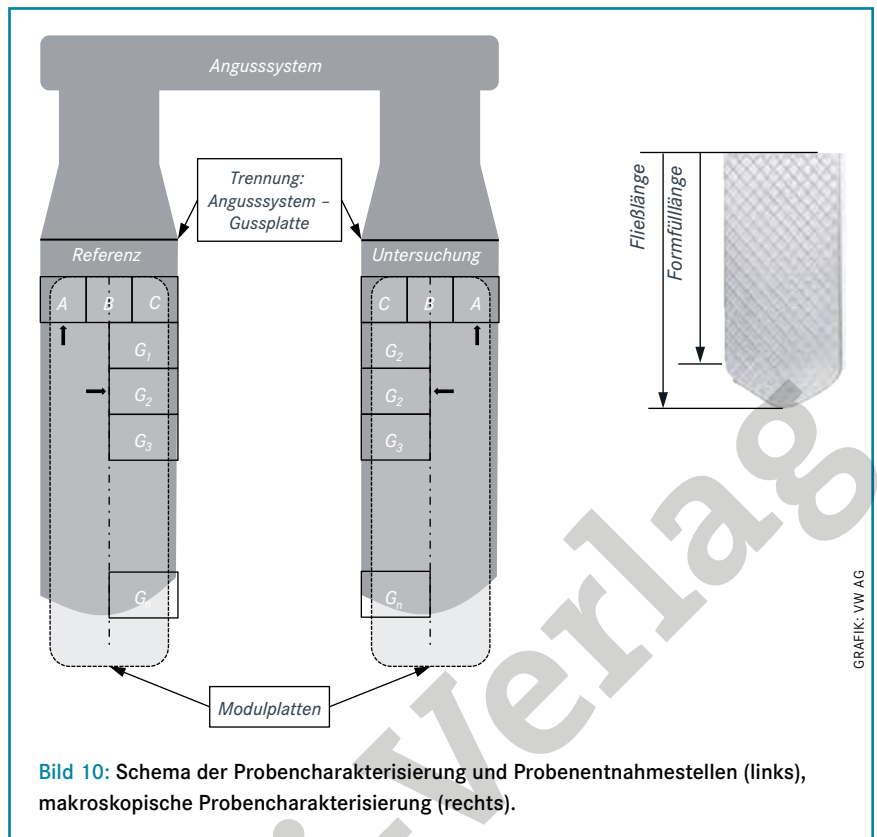


Bild 10: Schema der Probencharakterisierung und Probenentnahmestellen (links), makroskopische Probencharakterisierung (rechts).

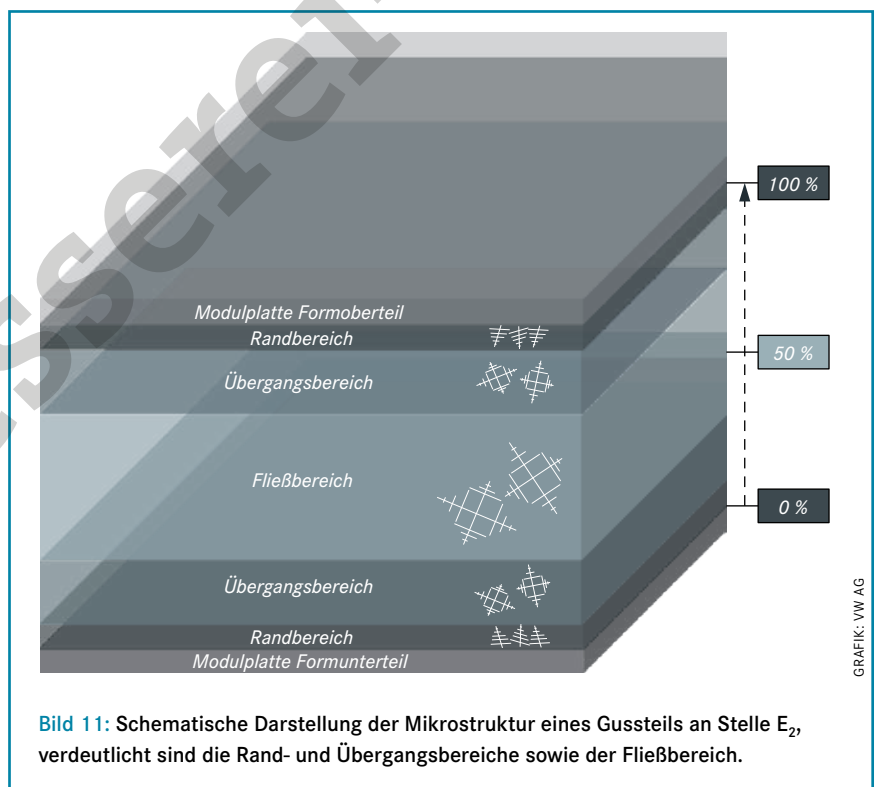


Bild 11: Schematische Darstellung der Mikrostruktur eines Gussteils an Stelle E<sub>2</sub>, verdeutlicht sind die Rand- und Übergangsbereiche sowie der Fließbereich.

weg steigt. Diese wäre in hohem Maße in Konstruktion und Herstellung aufwendig. Aufgrund dessen wird der Mittelwert der Strukturspitzenabstände im genannten Intervall für  $x$  gebildet. Dadurch entsteht die Rillenstruktur K mit gleichbleibendem Rillenabstand und gleichbleibender Rillentiefe.

Die Herstellung der Rillengeometrie erfolgt durch Laserbearbeitung. Das Er-

gebnis ist ähnlich dem des in Bild 6 gezeigten.

### Struktur K

Bionische Strukturen, wie die Schuppe der Haifischhaut (Bild 7), werden in der Technik häufig verwendet, um Strömungswiderstände zu reduzieren. Die gewählten Abmessungen sind vom jeweiligen Fluid und dessen Strömungsgeschwindigkeit



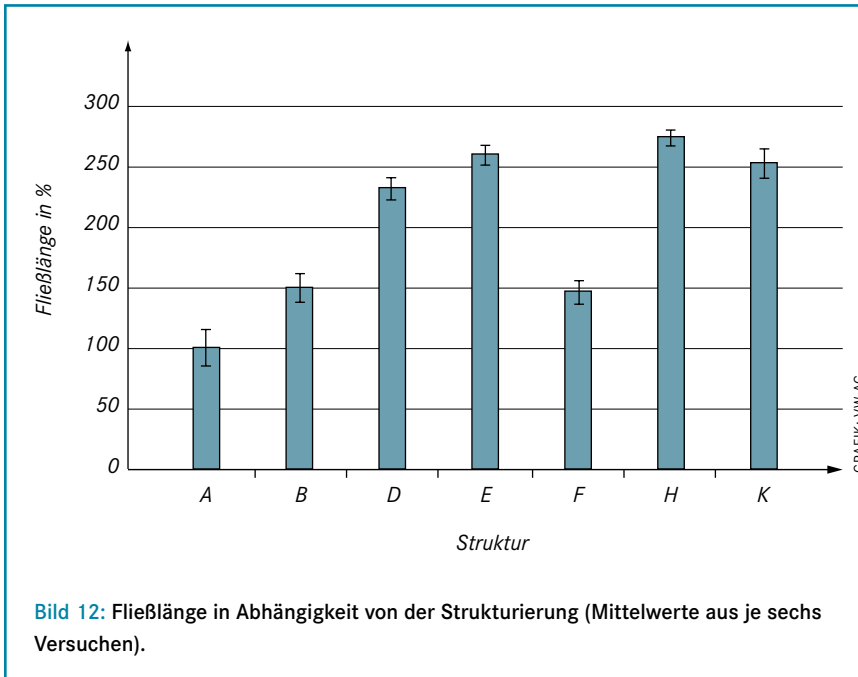


Bild 12: Fließlänge in Abhängigkeit von der Strukturierung (Mittelwerte aus je sechs Versuchen).

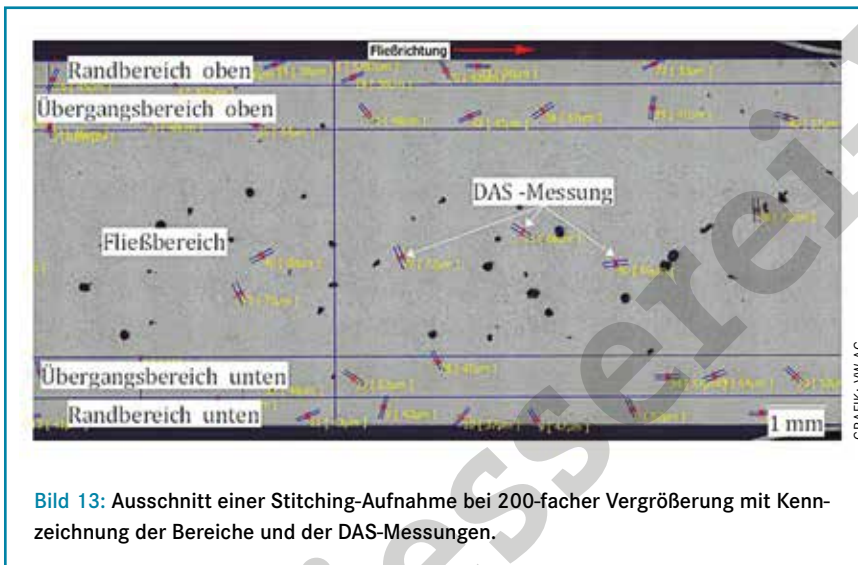


Bild 13: Ausschnitt einer Stitching-Aufnahme bei 200-facher Vergrößerung mit Kennzeichnung der Bereiche und der DAS-Messungen.

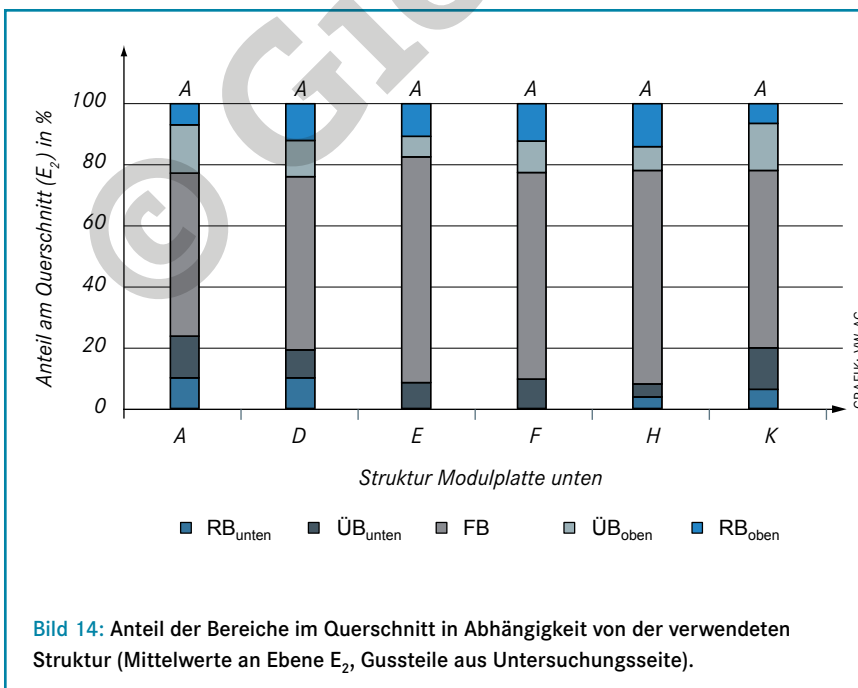


Bild 14: Anteil der Bereiche im Querschnitt in Abhängigkeit von der verwendeten Struktur (Mittelwerte an Ebene E<sub>2</sub>, Gussteile aus Untersuchungsseite).

abhängig. Für den Fall einer strömenden Aluminiumschmelze können die Auslegungskriterien der Rille übernommen werden. Es wird hier eine Struktur mit jeweils fünf verbundenen Erhebungen gewählt.

### Versuchsdurchführung

Für die Untersuchungen werden die in [1] vorgestellte Versuchskokille (Bild 8) und der dargestellte Versuchsaufbau (Bild 9) verwendet.

Die Versuchskokille wird durch einen widerstandsbeheizten Gießtisch indirekt auf ca. 350 °C erwärmt. Je Strukturvariante werden sechs Gussteile erzeugt, von denen jeweils zwei metallografisch analysiert werden. Der Abguss erfolgt mit einer naheutektischen AlSiMg-Legierung. Die Gießversuche werden ohne Verwendung von Schlichte durchgeführt.

Tabelle 1 fasst die Randbedingungen der Gießversuche im Labormaßstab zusammen.

Die Untersuchungen werden auf vergleichender Basis durchgeführt. Der Ausgangszustand der Versuchskokille ist für die Referenzversuche wie folgt definiert:

Die Oberflächen der eingesetzten Modulplatten im Kokillenoberteil und -unterteil der Referenzseite (Bild 8, rechts) werden jeweils durch Struktur A (glatt) wiedergegeben. In der Untersuchungsseite (links) werden die Strukturen A bis K im Kokillenunterteil installiert, während im Kokillenoberteil stets Struktur A eingesetzt ist. Für die Untersuchung der wanddickenabhängigen Fließlängen werden unter die Modulplatte der Untersuchungsseite dünne Bleche installiert, die eine Dicke von 8 % der Basiswanddicke aufweisen.

Nach Entnahme und Abkühlung der Gussteile werden die Fließlängen sowie die erstarrungsbedingten mikrostrukturellen Merkmale Schichtdickenverteilungen und Dendritenarmabstand (DAS) ermittelt. Die Schichten mit unterschiedlicher Gefügemorphologie resultieren aus den Erstarrungsbedingungen der plattenförmigen Gussteile. Die einzelnen Schichten sind wie folgt definiert:

- > Randbereich (RB): dichtes Gefüge, geringer DAS, kaum Porosität, gerichtete Erstarrung vom Rand zur Mitte,
- > Übergangsbereich (ÜB): Mischgefüge aus Rand- und Fließbereich und
- > Fließbereich (FB): aufgelockertes Gefüge, erhöhter DAS, hohe Porosität, kein Anteil gerichteter Erstarrung, erhöhter Anteil an eutektischen Zellen.

Die Ermittlung dieser Kennwerte erfolgt jeweils im Plattenquerschnitt in Längs-

richtung parallel zur Strömungsrichtung. Die Proben werden nach Bild 10 an Stelle E<sub>2</sub> entnommen, geschliffen und poliert. Bild 11 zeigt schematisch die o. g. Bereiche des Querschnitts. Die Analyse erfolgt anhand von Stitching-Aufnahmen bei 200-facher Vergrößerung (Keyence VHX-2000).

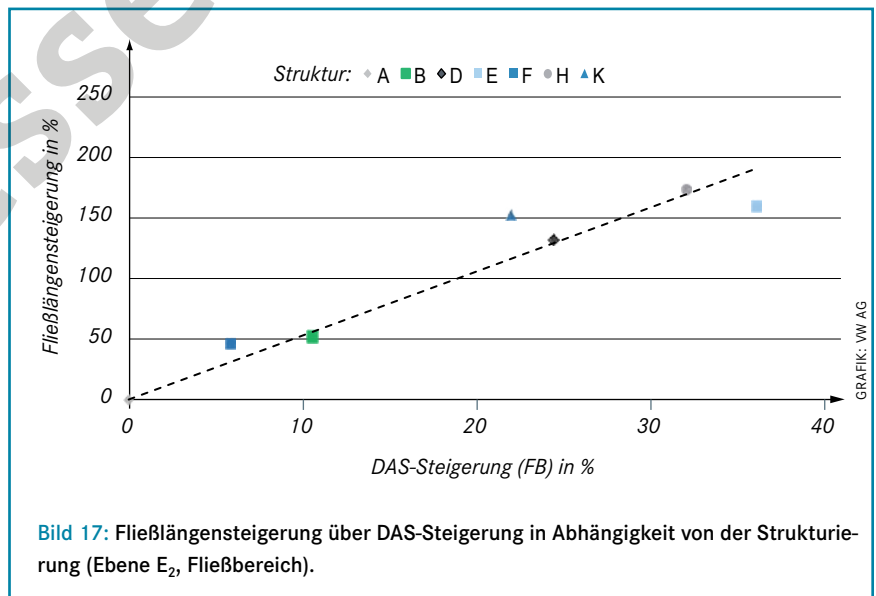
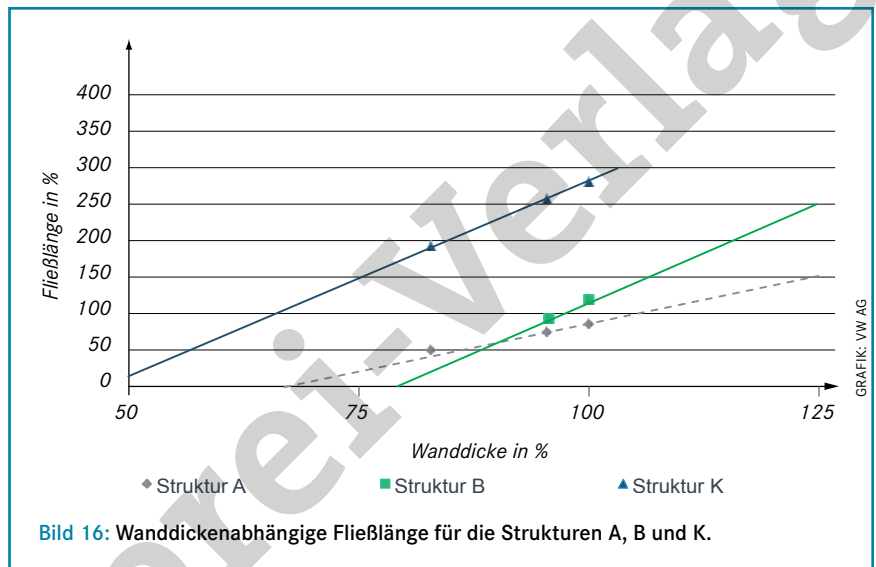
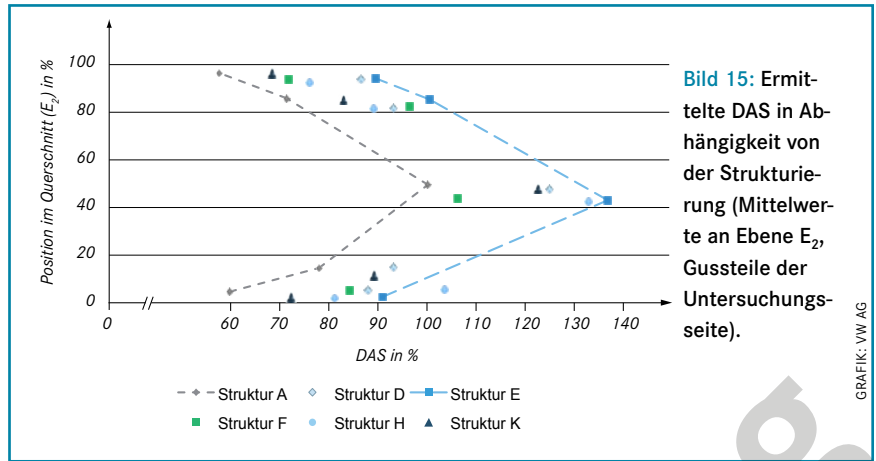
## Ergebnisse und Auswertung

In Bild 12 sind die Fließlängen prozentual in Abhängigkeit von der verwendeten Strukturierung dargestellt. Struktur A stellt stets die Referenz dar. Die ermittelten Fließlängen werden relativ zur Referenz angegeben (Struktur A entspricht 100 %). Durch das Einlegen der strukturierten Modulplatten in die Untersuchungsseite können im Vergleich zur unstrukturierten Oberfläche signifikante Fließlängensteigerungen erzielt werden.

Die geringste Steigerung wurde für Struktur F ermittelt, deren Fließlänge in etwa der der Struktur B (Waffelmuster) entspricht [1]. Die mit D und E bezeichneten Varianten der Waffelmuster-Strukturierung stellen eine deutliche Verbesserung dar. Die ermittelten Fließlängensteigerungen betragen 132 % (D) bzw. 160 % (E). Durch die Verwendung von Struktur H, der Rillenstruktur, wird die maximale Fließlängensteigerung dieser Untersuchungsreihe (174 %) erreicht, während die bionische Struktur K mit ca. 153 % eine etwas geringere Steigerung aufweist.

In der mikrostrukturellen Analyse wurden die Parameter Schichtdickenverteilung und DAS an je zwei Gussplatten der Untersuchungsseite ermittelt. Beispielfhaft wird eine Auswertung in Bild 13 gezeigt. Die Ergebnisse der erstarrungsbedingten Schichtdickenverteilung der Querschnitte sind in Bild 14 dargestellt. Je nach Strukturierung ergeben sich unterschiedliche Schichtverteilungen im Querschnitt. Struktur A (Referenz) weist eine nahezu symmetrische Verteilung der Schichten auf. Der Anteil des Fließbereiches beträgt ca. 54 % und die Summe der oberen und unteren Bereiche jeweils ca. 23 %. Betrachtet man die Schichtverteilungen der Strukturen D bis H, so erkennt man, dass der Anteil FB von ca. 50 % auf >70 % steigt. Die Summe aus RB- und ÜB unten sinkt von ca. 23 % auf <10 %, während die Summe aus RB- und ÜB oben relativ konstant bei ca. 23 % bleibt.

Werden die Ergebnisse der Schichtverteilung mit den ermittelten Fließlängensteigerungen verglichen, so führen ähnliche Fließlängen zu ähnlicher Verteilung der Schichten im Querschnitt. Eine Ausnahme bildet Struktur F. Die Schichtverteilung ist



**Tabelle 1: Parameter der Gießversuche im Labormaßstab.**

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

ähnlich der von Struktur E, jedoch ist die ermittelte Fließlänge deutlich geringer.

In **Bild 15** sind die Mittelwerte der DAS der untersuchten Proben grafisch dargestellt. Die minimalen DAS der jeweiligen Bereiche wurden für Struktur A ermittelt. Diese liegen in den Randbereichen bei ca. 60 % und in der Mitte bei ca. 100 %. Bei Verwendung der strukturierten Oberflächen wurden stets erhöhte DAS ermittelt. Die maximalen DAS im oberen (ca. 88 %) und mittleren (ca. 136 %) Bereich der Gussplatte wurden bei Struktur E detektiert. Es kann festgehalten werden, dass sich in Abhängigkeit von Struktur und Fließlänge sowohl die Schichtverteilung als auch die DAS verändern. Die Erstarrung der Schmelze kann demnach durch die Strukturierung der Kokillenoberfläche beeinflusst werden.

## Wanddickenreduzierung

Für die Untersuchung der wanddickenabhängigen Fließwege wurden die Strukturen A, B (aus [1]) und K verwendet. Die Wanddicke wurde bei Verwendung der Strukturen A und K um bis zu 17 % und bei Struktur B um 8 % gegenüber der Referenz reduziert. **Bild 16** zeigt die gemittelten Fließlängen in Abhängigkeit von Struktur und Wanddicke. Die Referenz (100 %) wird durch Struktur A abgebildet.

Wie **Bild 16** zu entnehmen ist, sinkt bei Wanddickenreduzierung die erreichbare Fließlänge unabhängig von der verwendeten Struktur. Die Fließlänge von Struktur B sinkt dabei stärker als die von Struktur A, so dass sich zwischen 80 % und 90 % ein Schnittpunkt der linearen Trendlinien ergibt. Somit scheint Struktur B bei Wanddicken <90 % eine negative Wirkung auf die Fließlänge gegenüber Struktur A zu besitzen. Für Struktur K wurden bei den eingestellten Wanddicken stets Fließlängen >150 % ermittelt. Diese Struktur kann effektiv zur Reduzierung der Wanddicken eingesetzt werden, ohne dabei die Fließlänge gegenüber Struktur A zu verringern.

## Diskussion

Die Untersuchungsergebnisse zeigen eine deutliche Steigerung der Fließlänge in Abhängigkeit von der verwendeten Strukturierung. Durch die Beeinflussung der Oberflächenstrukturierung im Kokillenteil ändern sich neben den Fließlängen sowohl die Verteilung der Bereiche im Querschnitt als auch die jeweiligen DAS. Dabei sind vor allem die strukturabhängigen DAS interessant, wenn es um die Hintergründe der Fließlängensteigerung geht. In **Bild 15** wurde der Zusammenhang

zwischen DAS (in Abhängigkeit von der Position im Querschnitt) und der Struktur dargestellt. Ermittelt man das Verhältnis von Fließlängensteigerung zu DAS-Steigerung gegenüber der unstrukturierten Oberfläche im definierten Fließbereich, erhält man **Bild 17**. Darin sind die hier untersuchten Strukturen einzeln dargestellt. Erkennbar ist, dass eine Fließlängensteigerung stets mit einer Steigerung der DAS-Werte einhergeht. Dabei gibt es Unterschiede zwischen den Strukturen. Eine hohe DAS-Steigerung könnte durch eine erhöhte Isolationswirkung begründet sein. Die Werte für die Strukturen F und K liegen oberhalb der angedeuteten Geraden. Die Fließlängensteigerung ist überproportional. Dies könnte ein Hinweis auf weitere wirkende Mechanismen (z. B. Strömungsbeeinflussung) sein.

In [1] wurde in den Simulationen gezeigt, dass sich durch die Verwendung der Standardstrukturen (B oder C) Luftspalte zwischen Schmelze und Kokille bilden können. Demnach kann durch die reduzierte Kontaktfläche zwischen Kokille und Schmelze aufgrund der in den Hohlräumen eingeschlossenen Luft eine thermische Isolationswirkung erzielt werden. Durch Strukturierungen, die während des Formfüllvorgangs nicht von der Schmelze abgebildet werden, kann demnach die Fließlänge gesteigert werden. Weiterhin wurde angemerkt, dass allein durch die Isolationswirkung nicht von einer deutlichen Fließlängensteigerung ausgegangen werden kann (Unterschied zwischen den Strukturen B und C). Nach den Ergebnissen der DAS-Auswertung könnte dies ebenfalls für die Strukturen F und K zutreffen, da deren Werte für DAS- und Fließlängensteigerung oberhalb der Geraden liegen.

## Zusammenfassung und Ausblick

In der vorangegangenen Veröffentlichung [1] wurden die bekannten Standardstrukturen (B, C) hinsichtlich ihrer Wirkung auf die Fließlängensteigerung simulativ und experimentell untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass diese berechtigt für die Unterstützung des Formfüllvorganges eingesetzt werden. Im weiteren Verlauf wurden weitere Strukturen entwickelt. Dazu zählen sowohl optimierte Standardstrukturen (D, E) als auch technische (H) und bionische (F, K) Strukturen, die für das Schwerkraftkokillengießen ausgelegt wurden. Diese Strukturen wurden in je sechs Gießversuchen erprobt. Die makroskopische Analyse erfolgte an jedem, die mikroskopische an je zwei der erzeugten Gussteile.

Es konnten signifikante Fließlängensteigerungen von 45 % bis 174 % erzielt werden. Die mikrostrukturelle Analyse der Gussteile ergab, dass die Strukturierung starken Einfluss auf die Erstarrung haben kann. Hohe Fließwege wurden meist in Zusammenhang mit starker Zunahme des Fließbereichs (FB) und des darin befindlichen DAS ermittelt.

Weiterhin wurde festgestellt, dass eine Reduzierung der Wanddicken durch die Verwendung von strukturierten Oberflächen ermöglicht werden kann. Jedoch gilt diese Aussage nicht generell für alle Strukturen.

Die bisherigen Untersuchungen beschränkten sich auf die schlichtefreie Anwendung. In weiteren Versuchsreihen sollen der Einfluss von Schlichte auf die Fließlängensteigerung und die Anwendbarkeit im Serienprozess thematisiert werden.

*Die vorliegenden Untersuchungen entstanden in enger Zusammenarbeit der VW-Fachbereiche Konzernforschung Wolfsburg, der Entwicklung Achsen des Geschäftsfeldes Fahrwerk, dem Komponenten-Werkzeugbau und dem Leichtmetallzentrum aus Braunschweig. Des Weiteren sei der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg sowie der Technischen Universität Bergakademie Freiberg für die Betreuung gedankt. Herzlicher Dank gilt Prof. Dr.-Ing. A. Bührig-Polaczek, Prof. Dr.-Ing. R. Bähr sowie Prof. Dr.-Ing. K. Eigenfeld.*

*Dipl.-Ing. Sebastian Gierth, M.Sc. Stephan Knorr, Dipl.-Ing. Thomas Beganovic und Dr.-Ing. Sebastian Findeisen, Volkswagen Aktiengesellschaft, Wolfsburg, Braunschweig*

## Literatur:

- [1] *Giesserei 102 (2015), [Nr. 12], S. 42-49.*
- [2] *Szalaj, B.: Optimierung des Kokillengießverfahrens auf Schutzgasanwendungen. Diss. RWTH Aachen, 2010.*
- [3] *Nachtigall, W.; Wissler, A.: Bionik in Beispielen. Springer, Berlin Heidelberg, 2013.*
- [4] *Oertel, H., u. a.: Bioströmungsmechanik. Vieweg+Teubner, Wiesbaden, 2012.*
- [5] *J. Fluid Mech. (1989), [Nr. 206], S. 105-129.*
- [6] *Bechert, D.; Bruse, M.; Hage, W., u. a.: Fluid mechanics of biological surfaces and their technological application. In Naturwissenschaften (87), Springer, 2000.*
- [7] *J. Fluid Mech (1991), [Nr. 228], S. 87-109.*
- [8] *Kümmel, W.: Technische Strömungsmechanik – Theorie und Praxis. Teubner, Wiesbaden, 2007.*