
Einfluss einer strukturierten Kokillenoberfläche auf das Fließ- und Formfüllungsvermögen beim Aluminiumgießen

Dissertation

Zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktoringenieur
(Dr.-Ing.)**

von M.Sc. Stephan Ralph Knorr
geb. am 29.11.1987 in Plauen, Deutschland

genehmigt durch die Fakultät Maschinenbau
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. habil. Dr.-Ing. E. h. Rüdiger Bähr
Prof. Dr.-Ing. Klaus Eigenfeld

Promotionskolloquium am 05.07.2018

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit im Komponenten-Werkzeugbau in der Abteilung Formenbau des Kompetenz-Center-Technik der Volkswagen AG in Braunschweig. Mein Dank gilt meinem ehemaligen Abteilungsleiter für die Bereitstellung aller notwendigen Ressourcen, die gewährten Freiheiten und das entgegengebrachte Vertrauen zur Anfertigung dieser Arbeit.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Dr.-Ing. E. h. Rüdiger Bähr, Bereichsleiter der Ur- und Umformtechnik am Institut für Fertigungstechnik und Qualitätssicherung an der Otto von Guericke Universität Magdeburg für die Übernahme der Betreuung.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Eigenfeld möchte ich für die Übernahme des Zweitgutachtens dieser Arbeit ganz herzlich danken.

Bedanken möchte ich mich für die unternehmensseitige Betreuung. Die zahlreichen Diskussionsrunden, kritischen Hinterfragungen und das fachliche Feedback trugen zum Erfolg dieser Arbeit bei.

Spezieller Dank gilt an alle meine Kollegen aus dem Werkzeugbau und dem Leichtmetallzentrum, welche mich tatkräftig unterstützt haben und ohne die viele Versuche nicht möglich gewesen wären. Dank gilt den Studenten, die mich im Rahmen ihrer studentischen Tätigkeit ebenfalls tatkräftig unterstützten.

Ebenso möchte ich mich bei Chris Michaelis von der Otto von Guericke Universität Magdeburg für die sehr gute Zusammenarbeit, für die Durchführung zahlreicher Untersuchungen und für die fachlichen Diskussionen bedanken.

Meiner Familie und meinem Freunden gilt mein besonderer Dank. Auf deren Unterstützung und Rückhalt konnte ich mich zu jeder Zeit verlassen.

Disclaimer

Veröffentlichungen über den Inhalt der Arbeit sind nur mit schriftlicher Genehmigung der Volkswagen Aktiengesellschaft zugelassen. Ergebnisse, Meinungen und Schlüsse dieser Dissertation sind nicht notwendigerweise die der Volkswagen Aktiengesellschaft.

Publications about the content of this work require the written consent of Volkswagen Aktiengesellschaft. The results, opinions and conclusions expressed in this thesis are not necessarily those of Volkswagen Aktiengesellschaft.

Zusammenfassung

Oberflächenstrukturierte Gießwerkzeuge zählen zum Stand der Technik und werden seit mehreren Jahrzehnten gezielt eingesetzt, um die gießtechnologischen Eigenschaften von Schmelzen positiv zu beeinflussen. Ziel ist stets die Sicherstellung der Prozesssicherheit und die Erreichung einer nachhaltigen Wirtschaftlichkeit. Der Leichtbau bei Gussteilen nimmt in der Automobilbranche eine zentrale Rolle ein. Ein Ansatz zur Reduzierung der fertigungsbedingten Gussteilwandstärke ist der gezielte Einsatz von Oberflächenstrukturen. Nachweislich kann somit die Wandstärke partiell um bis zu 30 % reduziert werden, wodurch sich Masseeinsparungen von mehr als 10 % pro Gussteil ergeben können. Aufbauend auf einer Potenzialanalyse der Oberflächenstrukturen auf das Fließ- und Formfüllungsvermögen, werden drei aus dem Stand der Technik recherchierte Wirkmechanismen analysiert. Die wärmeisolierende Wirkung der Oberflächenstrukturen auf die Schmelze wird mittels Thermographie- und Hochgeschwindigkeitsaufnahmen während des Formfüllvorganges analysiert. Der wärmeabführende Effekt von Oberflächenstrukturen wird mittels Gefügeanalysen an ansprechend hergestellten Gussteilen mit Oberflächenstruktur näher untersucht. Zur Analyse des Effektes der aufreißenden Oxidhaut an der Schmelzefront werden Schutzgasuntersuchungen unter Argon-Atmosphäre durchgeführt. Aus den gewonnenen Erkenntnissen über die Wirkmechanismen von Oberflächenstrukturen wird ein Ansatz zur mathematischen Berechnung der Fließlänge abgeleitet sowie eine verbesserte Oberflächenstruktur entwickelt. Als Ansatz dient die Berechnung des Wärmedurchlasskoeffizienten durch einen strukturierten, oberflächennahen Bereich der Kokille. Die Arbeit schließt mit der Ableitung von Strukturempfehlungen ab, um zukünftig eine wissensbasierte, auf den Gießprozess abgestimmte, Oberflächenstrukturierung bei Gießwerkzeugen vornehmen zu können. Hierbei wird die ideale, prozessspezifische Strukturauslegung thematisiert. Des Weiteren werden die Themen Lebensdauer der Oberflächenstrukturen im Gießbetrieb und der Einfluss strukturierter Gussteiloberflächen auf die Dauerfestigkeit der Gussbauteile angeschnitten.

Abstract

Surface structured casting tools are part of the state of the art and are used for several decades in order to positively influence the casting technological properties of metal melts. The aim is always to ensure process reliability and to achieve sustainable economic efficiency. Lightweight construction at castings plays a central role in the automotive sector. One approach to reduce the production related casting wall thickness is the targeted use of surface structures. It is proved that the wall thickness can partially be reduced by up to 30 %, which results in possible weight savings of more than 10 % per casting. Based on a potential analysis of the surface structures on the flow and shape filling capacity, three physical effects are analyzed. The heat insulating effect of the surface structures on the aluminum melt is analyzed by means of thermography and high speed recording during the mold filling process. The heat dissipating effect of surface structured tools is investigated by microstructural analysis on castings with surface structure. The analysis of the effect of the breaking oxide skin on the front of the melt is investigated with the help of protective gas tests. An approach for the mathematical calculation of the flow length is derived by the knowledge about the physical effects of surface structured casting tools. An improved surface structure is also developed. The development is based on the calculation of the heat transmission coefficient through a structured area of the mold close to the surface. The work concludes with the derivation of structural recommendations for casting tools and further, a knowledge-based surface structuring for casting tools can be carried out. The ideal surface structure design, the durability of the surface structures in the casting process and the effects on the durability of the structured castings are discussed.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|------------|
| Danksagung | III |
| Disclaimer | IV |
| Zusammenfassung | V |
| Abstract | VI |
| 1 Einleitung | 1 |
| 2 Problemstellung und Zielsetzung | 3 |
| 3 Aufbau und Untersuchungsmethodik | 5 |
| 4 Stand der Technik | 7 |
| 4.1 Kokillengießen | 7 |
| 4.1.1 Verfahren | 7 |
| 4.1.2 Kokille | 7 |
| 4.1.3 Gussteil und Gusswerkstoff Aluminium..... | 8 |
| 4.2 Gießtechnologische Eigenschaften von Aluminium..... | 9 |
| 4.2.1 Fließlänge | 10 |
| 4.2.1.1 Definition..... | 10 |
| 4.2.1.2 Bisherige Untersuchungen..... | 11 |
| 4.2.1.3 Zusammenfassung und Bewertung der Einflussgrößen | 21 |
| 4.2.2 Formfüllungsvermögen | 21 |
| 4.2.2.1 Definition..... | 21 |
| 4.2.2.2 Bisherige Untersuchungen..... | 21 |
| 4.2.2.3 Zusammenfassung und Bewertung der Einflussgrößen | 25 |
| 4.2.3 Erstarrung und Erstarrungsmorphologie | 25 |
| 4.3 Funktionale Oberflächen in der Gießereitechnik | 29 |
| 4.3.1 Schichten | 29 |
| 4.3.2 Oberflächenstrukturen..... | 32 |

| | |
|--|-----------|
| 4.3.2.1 Einsatzgebiete | 32 |
| 4.3.2.2 Strang- und Bandgießen..... | 32 |
| 4.3.2.3 Gießen mit verlorenen Formen | 33 |
| 4.3.2.4 Druckgießen..... | 34 |
| 4.3.2.5 Kokillengießen | 35 |
| 4.3.2.6 Auswirkung auf das Gussteil..... | 37 |
| 4.3.3 Zusammenfassung..... | 38 |
| 5 Voruntersuchung – Potenzialanalyse | 39 |
| 5.1 Simulation..... | 39 |
| 5.1.1 Modellbeschreibung | 39 |
| 5.1.2 Durchführung | 41 |
| 5.1.3 Auswertung | 44 |
| 5.2 Experiment | 45 |
| 5.2.1 Versuchsaufbau | 45 |
| 5.2.1.1 Gießplatz | 45 |
| 5.2.1.2 Modulare Kokille | 46 |
| 5.2.1.3 Oberflächenstrukturen | 48 |
| 5.2.2 Durchführung | 51 |
| 5.2.3 Auswertung | 52 |
| 5.3 Zusammenfassung | 54 |
| 6 Hauptuntersuchung – Analyse Wirkmechanismen | 57 |
| 6.1 Wärmeisolation..... | 57 |
| 6.1.1 Simulation | 57 |
| 6.1.2 Experiment..... | 61 |
| 6.1.2.1 Thermographieaufnahmen..... | 61 |
| 6.1.2.2 Hochgeschwindigkeitsaufnahmen..... | 69 |
| 6.1.2.3 Reduzierung des metallostatistischen Druckes | 75 |
| 6.1.3 Zusammenfassung..... | 78 |
| 6.2 Wärmeabfuhr | 82 |

| | |
|--|--------------|
| 6.2.1 Simulation | 82 |
| 6.2.2 Experiment | 86 |
| 6.2.3 Zusammenfassung..... | 88 |
| 6.3 Aufreißen der Oxidhaut..... | 91 |
| 6.3.1 Simulation | 91 |
| 6.3.2 Experiment | 93 |
| 6.3.3 Zusammenfassung..... | 96 |
| 7 Strukturverbesserung | 97 |
| 7.1 Einflussanalyse von Strukturmerkmalen | 97 |
| 7.2 Mathematische Berechnung der Fließlänge..... | 99 |
| 7.3 Ableitung einer Struktur | 103 |
| 8 Diskussion und Beurteilung der Ergebnisse | 104 |
| 8.1 Simulation..... | 104 |
| 8.2 Experiment | 106 |
| 9 Ableitung von Strukturempfehlungen | 109 |
| 10 Zusammenfassung und Ausblick | 112 |
| Abbildungsverzeichnis | VI |
| Tabellenverzeichnis | X |
| Literaturverzeichnis | XI |
| Nomenklatur | XXI |
| Anhang | XXV |
| Ehrenerklärung | LXXI |
| Declaration of Honor | LXXII |

1 Einleitung

Die Automobilbranche befindet sich in einem epochalen Wandel vom klassischen Automobil mit Verbrennungsmotor zum vollelektrischen, vernetzten, autonomen Automobil in einer noch nie dagewesen Form. Dabei gilt es die vielschichtigen Bedürfnisse der Kunden zu erfüllen, um das Leben rund um das Automobil der Zukunft zu erleichtern und zu bereichern, jedoch auch die Verantwortung für die Umwelt und Sicherheit zu übernehmen. Primärziel der vollelektrischen Automobile der Zukunft ist die dramatische Senkung der Umweltbelastungen durch alternative Antriebstechniken. Somit ist die Elektromobilität ein zentraler Baustein für ein nachhaltiges und klimaschonendes Verkehrssystem [1].

Bislang wurden fossile Energiespeicher für Verbrennungsmotoren genutzt. Diese einfache Art der Speicherung ermöglicht Reichweiten von über 1.000 km mit einer Tankfüllung [2]. Für den Antrieb von Elektromotoren wird elektrische Energie, welche in Li-Ion Akkumulatoren gespeichert wird, genutzt. Aktuelle, vollelektrische Automobile erzielen eine Reichweite von bis zu 500 km mit einer Aufladung [3; 4]. Ein Massen-/ Volumenvergleich beider Speichermedien für eine Reichweite von 500 km ist in Bild 1.1 dargestellt. Bezogen auf die Eigenmasse erkennt man, dass derzeitige Li-Ion Akkumulatoren noch eine deutlich geringere Energiedichte, im Vergleich zu fossilen Energieträgern, aufweisen [5; 6].

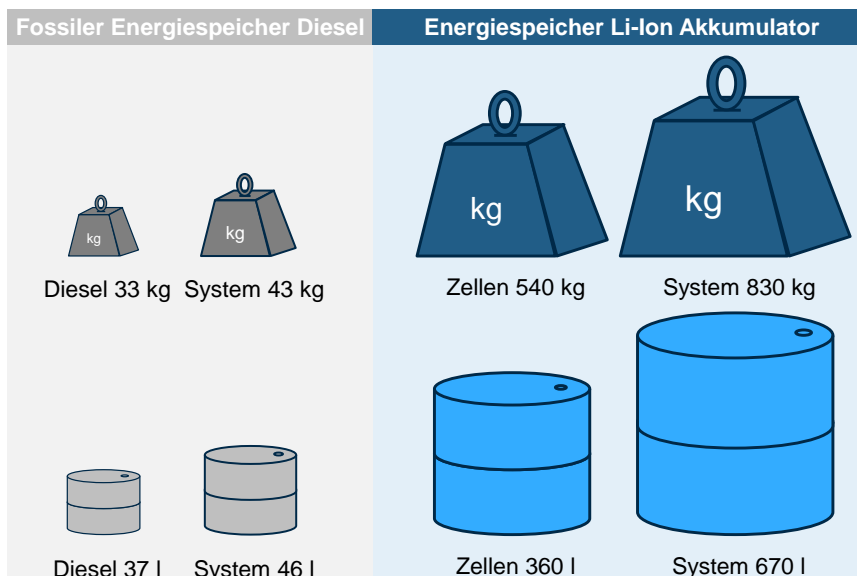


Bild 1.1: Aufzuwendende Massen und Volumina für eine Reichweite von 500 km [5; 6]

Die Darstellung macht deutlich, dass auch bei vollelektrischen Automobilen das Thema Leichtbau ein zentrales Thema bildet, um zukünftig einen entscheidenden Beitrag zur Vergrößerung der elektrischen Reichweite, zur Ressourcenschonung sowie zur Wahrung der Fahrzeugagilität und -dynamik zu leisten [7–9]. Hierbei steht die Automobilbranche ununterbrochen vor der Herausforderung die zunehmende Fahrzeugmasse durch zusätzliche Bauteile wie Batteriesysteme, Fahrerassistenz-systeme, Sensoren und Aktoren zu kompensieren [8; 10].

Zentrale Leichtbauthemen konzentrieren sich heutzutage auf die Karosserie, den Antriebsstrang inklusive der Batteriesysteme und auf das Fahrwerk. In diesen Bereichen setzt die Automobilbranche verstärkt auf den Werkstoff Aluminium. Durch den gezielten Einsatz ist es möglich, die Fahrzeugmasse, im Vergleich zu Stahlbauweise, deutlich zu reduzieren [9; 11–14].

Das Fahrwerk des aktuellen Golf VII trägt ca. 25 % zur Gesamtmasse des Fahrzeuges bei. Es besteht primär aus Stahl- und Gusseisen-Bauteilen. Stellvertretend für das mögliche Leichtbaupotenzial durch den Einsatz von Aluminium zeigt der Vergleich zu einem Audi S3-Fahrwerk in Bild 1.2. Die Substitution der Stahl- und Gusseisen-Bauteile ermöglicht eine Masseinsparung von bis zu 9 kg. Jedoch bieten selbst diese topologieoptimierten Aluminiumgussteile weitere, bislang ungenutzte Masseinsparpotenziale.

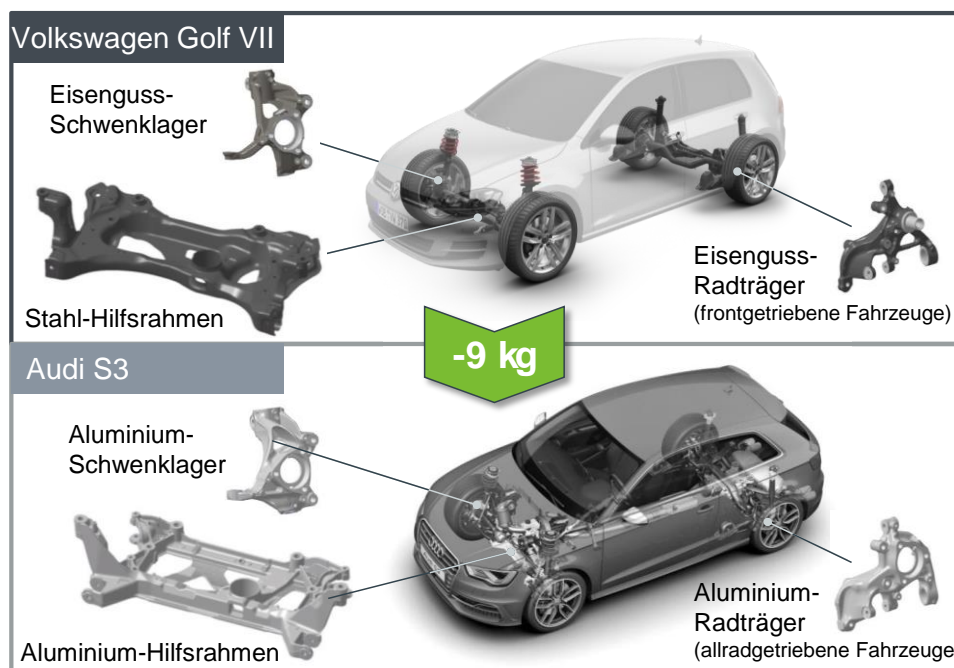


Bild 1.2: Einfluss der Fahrwerksbauteile aus Stahl, Gusseisen und Aluminium auf die Fahrzeugmasse bei einem Golf VII im Vergleich zu einem Audi S3 [15; 16]

Die abgebildeten Radträger und Schwenklager aus Aluminium des Audi S3 werden im Niederdruck-Kokillengießen hergestellt. Eine besondere Herausforderung für das Schwerkraft-Kokillengießen stellen dünnwandige Gussteile, wie der Hilfsrahmen der MQB-Plattform, dar. Dieses zentrale Bauteil der Vorderachse ist geometrisch anspruchsvoll und zeichnet sich durch zahlreiche dünne Rippen und Verstrebungen aus.

2 Problemstellung und Zielsetzung

Die Entwicklung und Auslegung von Gussteilen erfolgt unter Zuhilfenahme moderner Softwaretools. Hierdurch kann schnell und effizient die Herstellbarkeit analysiert, erforderliche Gussteilanpassungen durchgeführt und prozessrelevante Parameter abgeleitet werden. Hieraus ergeben sich erforderliche Mindestgussteilwandstärken, die ohne weitere technische Maßnahmen nicht reduziert werden können. So sind, je nach verwendetem Gießverfahren, unterschiedliche Gussteilwandstärken realisierbar. Beim Schwerkraft-Kokillengießen kann die Gussteilwandstärke u.a. durch ein verbessertes Fließ- und Formfüllungsvermögen reduziert werden.

Eine verbreitete Möglichkeit das Fließ- und Formfüllungsvermögen von Aluminiumlegierungen in dünnwandigen, kaltlaufgefährdeten Gussteilbereichen zu verbessern, ist der Einsatz von Oberflächenstrukturen. Diese sogenannten Waffelmuster werden bei der Kokillenherstellung in die Oberfläche eingebracht und bilden sich im späteren Gussteil erhaben aus. Ein Blick auf heutige Gussteile zeigt, dass diese, je nach Komplexität und Dünnwandigkeit, fast vollständig mit Oberflächenstrukturen bedeckt sind. Es existiert ein empirischer Erfahrungsschatz der Gießer und Werkzeugbauer, wie und in welchem Umfang es erforderlich ist, eine Oberflächenstruktur zur Sicherstellung der Prozesssicherheit und Reproduzierbarkeit einzusetzen. Das Problem ist, dass die zugrundeliegenden Wirkmechanismen nicht geklärt sind und das mögliche Potenzial der Oberflächenstrukturen nicht vollumfänglich ausgenutzt wird. Der MQB-Hilfsrahmen weist zahlreiche Oberflächenstrukturen auf, wodurch Minimalwandstärken von ca. 5,5 mm realisiert werden können. Hierbei entfallen ca. 3,5 mm auf den strukturmechanischen Anteil und ca. 2,0 mm auf den notwendigen fertigungstechnischen Anteil. Das bedeutet, in dünnwandigen Bauteilbereichen kommt es verfahrensbedingt zu einer Aufdickung der Wandstärke, um die Herstellbarkeit im Schwerkraft-Kokillengießen zu ermöglichen. Die Eliminierung dieser verfahrensbedingten Aufdickung durch den Einsatz einer verbesserten Oberflächenstruktur bietet ein bisher ungenutztes Potenzial zur Massereduzierung, vgl. Bild 2.1.

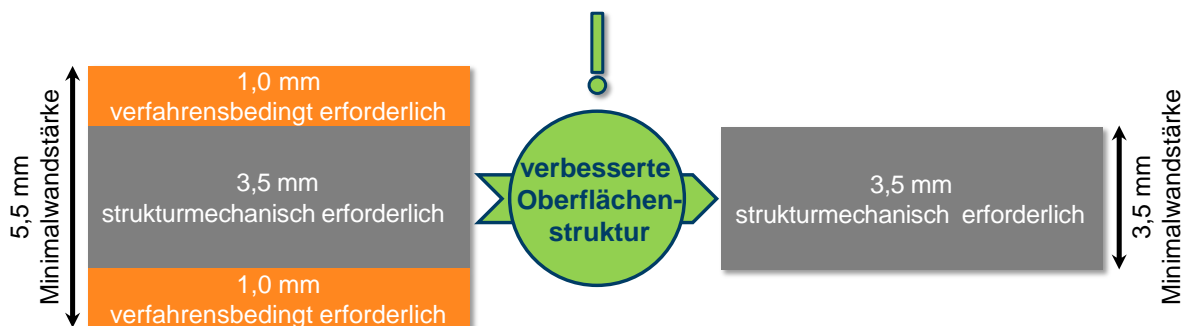


Bild 2.1: Reduzierung der Gussteilwandstärke durch eine verbesserte Oberflächenstruktur [16]

Mit dieser Arbeit soll der Einfluss von Oberflächenstrukturen auf das Fließ- und Formfüllungsvermögen von Aluminiumlegierungen untersucht, deren Potenzial aufgedeckt und die physikalischen Wirkmechanismen analysiert werden. Durch diesen Erkenntnisgewinn und die Entwicklung einer verbes-

serten Oberflächenstruktur soll zukünftig die verfahrensbedingte Gussteilwandstärke im Schwerkraft-Kokillengießen signifikant reduziert werden. Aufbauend auf dem empirischen Erfahrungsschatz der Gießer und Werkzeugbauer und den resultierenden Theorien über die Wirkmechanismen von Oberflächenstrukturen werden folgende Thesen aufgestellt, die mit der vorliegenden Arbeit verifiziert bzw. falsifiziert werden:

- a) *Oberflächenstrukturen verbessern die Fließ- und Formfülllänge!*
- b) *Oberflächenstrukturen reduzieren signifikant die Erstarrungsdauer!*
- c) *Das Aufreißen der Oxidhaut von flüssigem Aluminium verbessert die Fließ- und Formfülllänge!*
- d) *Richtungsabhängige Oberflächenstrukturen reduzieren den Strömungswiderstand!*
- e) *Wirksamkeit der Oberflächenstruktur ist vom wirkenden Druck abhängig!*
- f) *Die Wirksamkeit einer Oberflächenstruktur kann mittels des Gesamt-Wärmedurchlasskoeffizienten bestimmt werden!*
- g) *Der Verschleiß der Oberflächenstruktur führt zur Reduzierung der Fließ- und Formfülllänge!*
- h) *Oberflächenstrukturen haben einen negativen Einfluss auf die Dauerfestigkeit!*

Durch das Verständnis über die Wirkmechanismen der Oberflächenstrukturen sowie der Entwicklung einer verbesserten Oberflächenstruktur soll sichergestellt werden, dass zukünftige Gussteile und deren bislang ungenutztes Leichtbaupotenzial einen entscheidenden Beitrag zum Leichtbau, auch für vollelektrische Automobile, leisten können, siehe Bild 2.2.

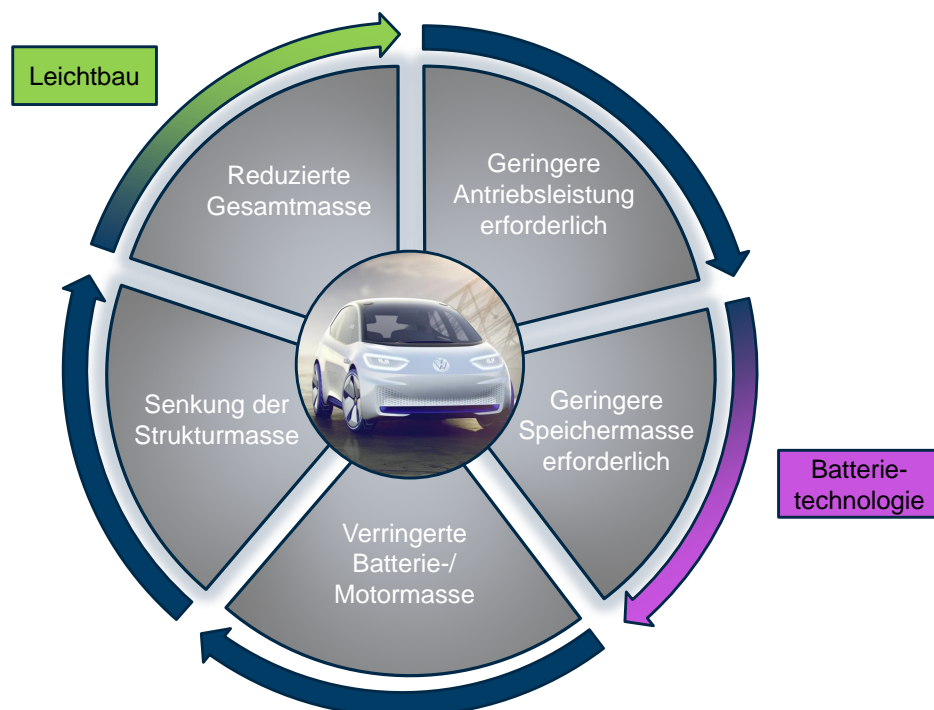


Bild 2.2 :Leichtbau bei vollelektrischen Automobilen in Anlehnung an [10; 17; 18]

3 Aufbau und Untersuchungsmethodik

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in fünf Teilgebiete: *Recherche zum Stand der Technik*, *Voruntersuchungen*, *Hauptuntersuchungen*, *Herleitung der Strukturverbesserung* und die *Ableitung von Strukturempfehlungen*.

Bild 3.1 stellt den Aufbau der Arbeit und die Untersuchungsmethodik dar. Im ersten Schritt erfolgt die Recherche zum Stand der Technik. Hauptaugenmerk sind hier die gießtechnologischen Eigenschaften von Aluminium sowie die derzeitigen Anwendungsgebiete, Funktionen und theoretischen Wirkmechanismen der Oberflächenstrukturen bei Gießwerkzeugen (4. Kapitel).

Anschließend werden numerische und experimentelle Voruntersuchungen zur Potenzialanalyse von Oberflächenstrukturen durchgeführt (5. Kapitel). Es erfolgt die Ermittlung des Einflusses einer strukturierten Kokillenoberfläche auf das Fließ- und Formfüllungsvermögen von Aluminium im Vergleich zu einer glatten Oberfläche. Für die numerischen Untersuchungen wird ein entsprechendes Berechnungsmodell entwickelt und die experimentellen Untersuchungen mit einer Versuchskokille durchgeführt.

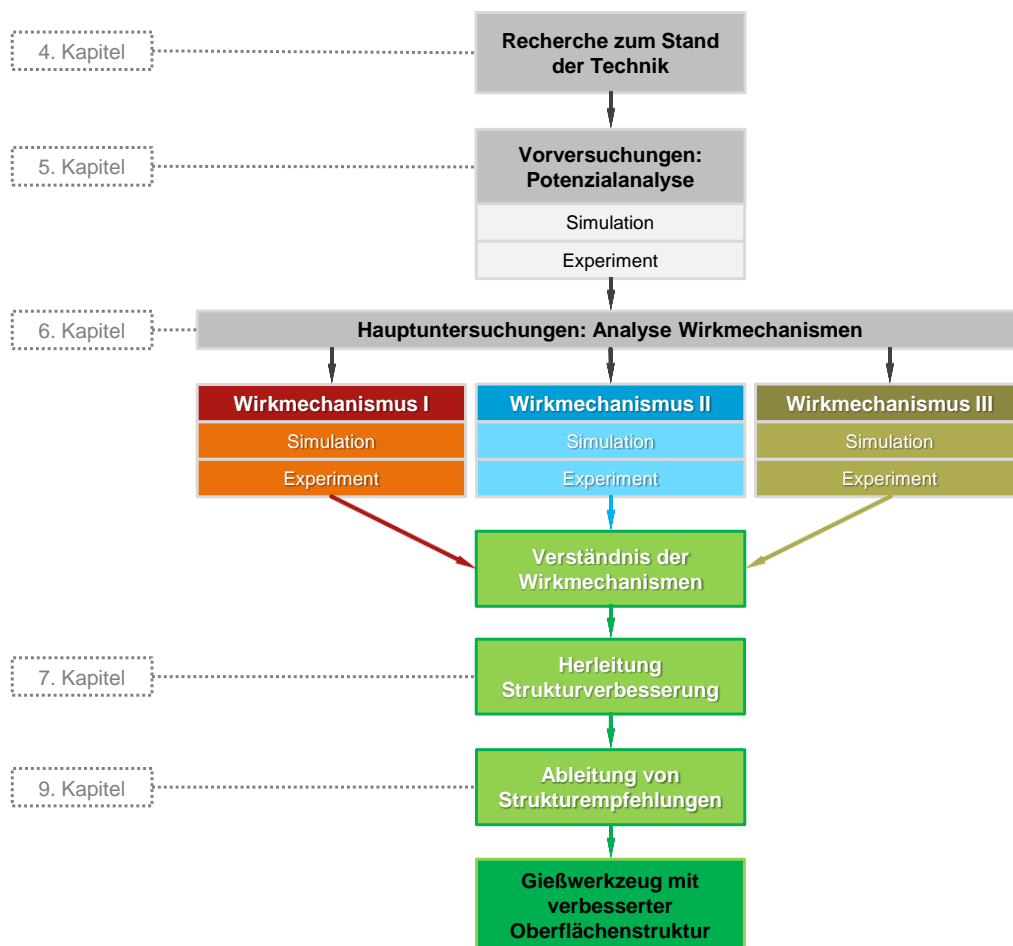


Bild 3.1: Aufbau der Arbeit und die Untersuchungsmethodik

In den anschließenden Hauptuntersuchungen werden drei identifizierte Wirkmechanismen der Oberflächenstrukturen im Schwerkraft-Kokillengießen untersucht (6. Kapitel). Die Untersuchungen basieren jeweils auf numerischen Berechnungen und experimentellen Untersuchungen.

Aufbauend auf dem Erkenntnisgewinn über die Wirkmechanismen der Oberflächenstrukturen erfolgt die Herleitung eines mathematischen Ansatzes zur Berechnung der Fließlänge für die oberflächenstrukturierte Versuchskokille. Dieser Ansatz wird zur Entwicklung einer neuen, verbesserten Oberflächenstruktur zur Steigerung der Fließ- und Formfülllänge genutzt (7. Kapitel).

Die Arbeit schließt mit der Ableitung von Strukturempfehlungen zur gezielten Beeinflussung der gießtechnologischen Eigenschaften von Aluminiumlegierungen ab (9. Kapitel). Diese Handlungsempfehlungen dienen zukünftig dem Gießer und Werkzeugbauer, um wissensbasiert eine prozess- und anwendungsspezifische Strukturierung der Kokillenoberfläche vornehmen zu können.

4 Stand der Technik

4.1 Kokillengießen

4.1.1 Verfahren

Die Einteilung der Fertigungsverfahren erfolgt nach DIN 8580. Hier findet man das Gießen in der ersten Hauptgruppe, dem Urformen. Diese Hauptgruppe wird definiert durch das „[...] Fertigen eines festen Körpers aus formlosen Stoff durch Schaffen des Zusammenhaltes.“ [19]

Das Schwerkraftgießen ist der Untergruppe 1.1 zugeordnet und wird definiert durch das „Urformen aus dem flüssigen Zustand.“ [20] Zu den Dauerformverfahren zählt das Schwerkraft-Kokillengießen. Dauerformen dominieren heutzutage bei den niedrigschmelzenden Gusswerkstoffen wie Nichteisenmetallen, Zink-, Aluminium- und Magnesiumlegierungen. Im Jahr 2011 wurden in Deutschland ca. 850.000 t Aluminiumguss hergestellt [20]. Das Kokillengießen ist nach dem Druckgießen das am häufigsten eingesetzte Gießverfahren [21; 22].

Der Gießprozess beim Kokillengießen lässt sich in 4 Bereiche einteilen. **Bereich I:** Reinigen der Kavität, Einlegen von Kernen und Filtern, Zusammenfahren der Formteile. Die geschlossene Kokille bildet nun im Inneren die Kavität, die das zu fertigende Gussteil darstellt. **Bereich II:** Das Einfüllen des flüssigen Metalls in die Kavität. Dabei fließt die Schmelze vom Eingießtrichter über das Gießsystem in die Kavität. Die Kavitätsfüllung erfolgt drucklos, nur unter der Wirkung der Schwerkraft. **Bereich III:** Erstarrung des flüssigen Metalls. Die Dichtspeisung bzw. die Kompensation des entstehenden Volumendefizites durch Schwindung des späteren Gussteiles erfolgt über das sogenannte Speisersystem. **Bereich IV:** Nach der vollständigen Erstarrung werden die Kokillenhälften auseinandergefahren und das Gussteil wird komplett mit dem Anguss- und Speisersystem entnommen.

4.1.2 Kokille

Beim Kokillengießen wird zwischen Vollkokillen und Gemischtkokillen unterschieden. Die Vollkokillen bestehen komplett aus Metall. Werden zum Beispiel verlorene oder Dauerkerne in die Kokille eingesetzt, spricht man von einer Gemischtkokille. Das Ziel ist eine höhere Gestaltungsfreiheit zu erreichen, ähnlich wie beim Gießen mit verlorenen Formen. [19; 20; 23; 24] Beim Kokillengießen ist es erforderlich, dass die Formen mit Fugen und Schlitzten ausgestattet werden, um das Entweichen der Luft in der Kavität während der Formfüllung zu ermöglichen [25].

Als Kokillenwerkstoffe werden primär (Warmarbeits-) Stähle, seltener Wolfram, Grafit oder Keramik eingesetzt. Die Oberflächenbeschaffenheit der Kokille sowie deren thermophysikalischen Eigenschaften ermöglichen eine zügigere Abkühlung des flüssigen Aluminiums, als beim Gießen mit verlorenen Formen. Die primären Einflussfaktoren sind die Wärmeleitfähigkeit des Warmarbeitsstahls 1.2343 von

ca. $30 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, die spezifische Wärmekapazität von ca. $460 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ und die Dichte von 7.800 kg/m^3 [19]. Für eine rasche Abkühlung sollte die Kokillenwandstärke das 5 bis 10-fache der Gussteilwandstärke betragen [25]. Das Verhältnis von Gussteilvolumen und Kokillenoberfläche übt einen entscheidenden Einfluss auf das Gussergebnis aus. Ein geringes Verhältnis hat zur Folge, dass durch die große Kontaktfläche die Erstarrung des Aluminiums besonders zügig abläuft. Hieraus resultieren Gussfehler, wie Kaltlauf, Luftporen und Abbildungsfehler. Abhilfen schaffen hier wärmeisolierend wirkende Schichten, die auf die Kokillenoberfläche aufgetragen werden oder der Einsatz von Oberflächenstrukturen.

Je nach Kokillenwerkstoff, Gusslegierung und Gussteilmasse können Kokillen eine Lebensdauer von 10.000 bis 250.000 Gussteilen erreichen, bevor diese durch Deformation oder Abnutzung unbrauchbar werden [25; 24].

4.1.3 Gussteil und Gusswerkstoff Aluminium

Im Kokillengießen hergestellte Gussteile zeichnen sich, im Vergleich zum Gießen mit verlorenen Formen, durch eine hohe Maßhaltigkeit (0,3 bis 1,6 %), eine sehr gute Oberflächenqualität ($R_z < 100 \mu\text{m}$) sowie einem feinen Gefüge ($\lambda_2 < 25 \mu\text{m}$) aus. Diese positiven Eigenschaften resultieren aus den thermophysikalischen Eigenschaften und der Oberflächenbeschaffenheit der Kokille.

Das Gießen ermöglicht, im Vergleich zu gefrästen oder gebauten Bauteilen, spannungsreduzierte Kraftlinienverläufe und gute mechanische Eigenschaften. Bei einer Dichte von ca. 2.700 kg/m^3 und Zugfestigkeiten von bis zu 410 MPa bieten Aluminiumlegierungen ein sehr gutes Dichte-Festigkeitsverhältnis, welches auf dem Niveau von unlegierten Baustahl (1.0038) liegt [26–28]. Eine wirtschaftliche Gussteilherstellung im Kokillengießen ist bei Stückzahlen von mehr als 10.000 Stück gegeben.

Die Aluminiumlegierungen werden in acht Hauptgruppen, entsprechend ihrem jeweiligen Hauptlegierungselement, eingeteilt. Die bedeutendsten Vertreter sind die AlCu, die AlSi, die AlMg sowie die AlZn Legierungsgruppen. Für die Gießereiindustrie ist die Automobilbranche der Hauptabnehmer. Hier ist vor allem die Gruppe der AlSi-Legierungen von Bedeutung, da diese Legierungsgruppe einen sehr guten Kompromiss aus Festigkeit, Dehnung und gießtechnologischen Eigenschaften bietet. AlSi-Legierungen werden unter anderem für folgende Baugruppen eingesetzt:

- Fahrwerk → Randträger, Schwenklager, Hilfsrahmen,
- Antrieb → Kurbelgehäuse, Zylinderköpfe, Motorengehäuse, Getriebegehäuse,
- Karosserie → Strukturknoten, Träger.

Die Gussteile werden zunehmend geometrisch anspruchsvoller mit einer steigenden Anzahl von Funktionsintegrationen. Als Beispiel soll der MQB-Hilfsrahmen aus einer AlSi11Mg Legierung dienen, siehe Bild 4.1. Der MQB-Hilfsrahmen ist ein Strukturgussteil und wird im Schwerkraft-Kokillengießen hergestellt. Die Abmessungen betragen ca. $800 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$ bei einer Fertigteilmasse von ca. $8,4 \text{ kg}$. Die minimale Gussteilwandstärke liegt aktuell bei $5,5 \text{ mm}$. Eine weitere, prozesssichere Redu-

zierung der Gussteilwandstärke bedarf der Verbesserung der gießtechnologischen Eigenschaften der verwendeten Aluminiumlegierung.

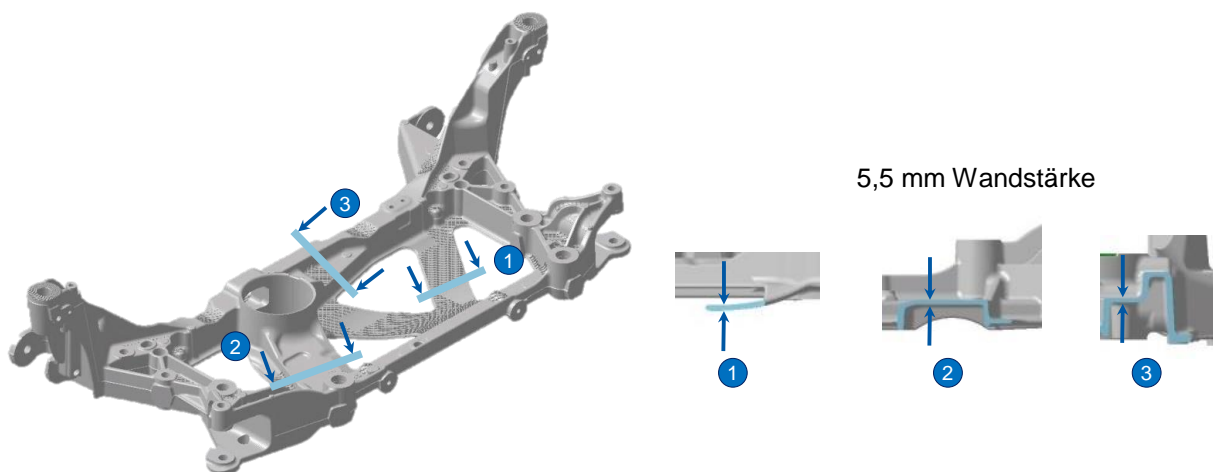


Bild 4.1: MQB-Hilfsrahmen aus einer AlSi11Mg-Legierung mit einer Minimalwandstärke von 5,5 mm

4.2 Gießtechnologische Eigenschaften von Aluminium

Die gießtechnologischen Eigenschaften einer Schmelze bestimmen das Verhalten während der Formfüllung und der Erstarrung in einer Kokille. Die Eigenschaften der Schmelze werden unter anderem von der Dichte, der Oberflächenspannung und der Viskosität sowie den Wechselwirkungen mit der Kokille bestimmt. Diese physikalischen Größen sind temperaturabhängig. Unter gießtechnologischen Eigenschaften versteht man folgende Begriffe [29–31]:

- Fließlänge,
- Formfülllänge,
- Speisungsvermögen,
- Warmrissverhalten,
- Lunkerverhalten.

Zur Beeinflussung der gießtechnologischen Eigenschaften stehen dem Gießer und dem Werkzeugbauer eine Vielzahl gut erforschter Möglichkeiten zur Verfügung, vgl. Bild 4.2. Kokillenseitig besteht die Möglichkeit der Anpassung des Temperierkonzeptes, des Gießsystems, des Kokillenwerkstoffes, der Schlichte und der Oberflächentopographie. Werkstoffseitig kann unter anderem das Legierungssystem optimiert, eine gezielte Schmelzebehandlung durchgeführt oder die Gießtemperatur angepasst werden [25; 32–36].

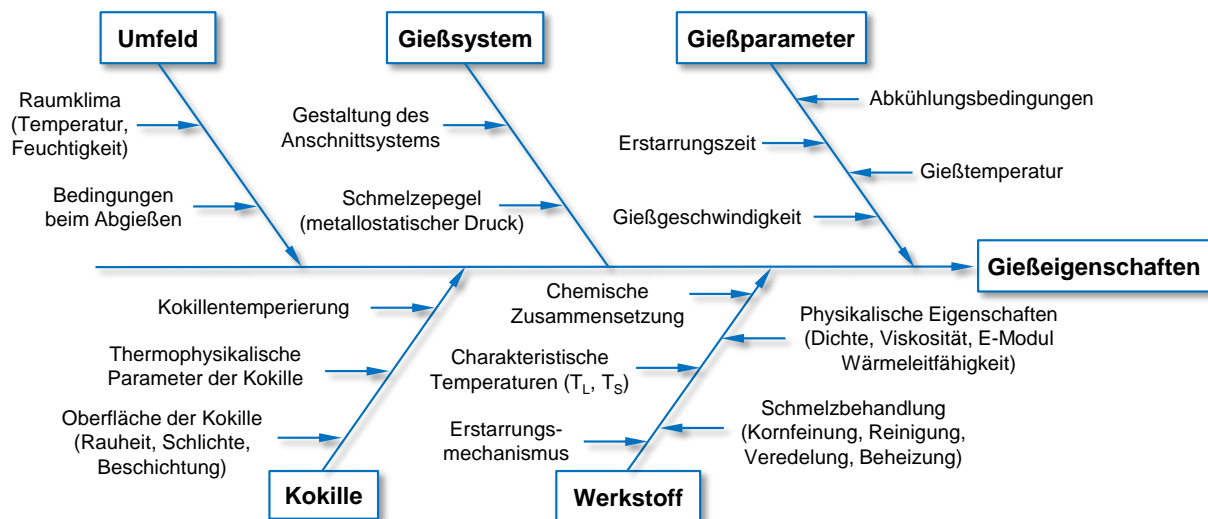


Bild 4.2: Einflussfaktoren auf die Gießeigenschaften von Aluminiumlegierungen nach [33; 37; 38]

Zum Verständnis der Inhalte dieser Arbeit werden nur auf die gießtechnologischen Eigenschaften der Fließ- und Formfülllänge sowie Erstarrung detailliert eingegangen.

4.2.1 Fließlänge

4.2.1.1 Definition

Die Fließlänge einer Schmelze kann wie folgt beschrieben werden: „Die Fließlänge einer Schmelze bezeichnet diejenige Länge, die diese in einem bestimmten Formkanal bis zu ihrer Erstarrung fließen kann. Es ist also eine Gießeigenschaft, die nicht nur von den Stoffdaten der Schmelze beeinflusst wird, sondern auch von den thermischen Eigenschaften des Formmaterials sowie dem Kanalquerschnitt der Gießtemperatur und dem Gießdruck.“ [39]

Ein häufig in der Gießerei auftretendes Problem ist das vorzeitige Erstarren der Schmelze in engen Kanalquerschnitten. Folgende Maßnahmen können zur Steigerung der Fließlänge getroffen werden [25]:

- Verkürzung der Fließwege durch die Erhöhung der Anschnittanzahl,
- Reduzierung der Gießdauer durch die Vergrößerung des Kanalquerschnittes,
- Erhöhung des metallostatischen Druckes und damit der kinetischen Energie der Schmelze,
- Erhöhung der Kokillentemperatur,
- Reduzierung der Viskosität der Schmelze durch Erhöhung der Gießtemperatur.

Diesen Maßnahmen sind bei Aluminiumlegierungen enge Grenzen gesetzt. Ein zu starkes Ansteigen der kinetischen Energie führt zu einer turbulenten Strömung. Hierdurch steigt das Risiko, dass das

spätere Gussteil mit Oxidheuten durchzogen ist. Die kritische Fließgeschwindigkeit im Kokillengießen beträgt ca. 1,5 m/s [40]. Eine Erhöhung der Gießtemperatur hat einen Abbrand von Legierungselementen und eine deutliche Wasserstoffaufnahme zur Folge [25].

4.2.1.2 Bisherige Untersuchungen

Zur Ermittlung der Fließlänge gibt es zahlreiche Methoden. Im deutschsprachigen Raum hat sich ein spiralförmiger Gießkanal etabliert, der durch die Wirkung der Schwerkraft gefüllt wird. Die Gießformen bestehen traditionell aus Formstoffen [41], jedoch auch Stahl- oder Aluminiumkokillen werden eingesetzt. Bezüglich des Aufbaues und der Auslegung des Kanalquerschnittes existieren zurzeit keine anerkannten Vorgaben. Die Auslaufkanäle der Kokille können trapezförmig, dreieckig, rund oder elliptisch sein [42–45]. Zur besseren Bestimmung der Formfülllänge bieten sich Spiralkokillen mit sternförmigen Kanalquerschnitt an [25]. Nachteile der Gießspirale sind der Formverzug, die inhomogene Temperaturverteilung, die nicht reproduzierbare Oberflächengüte, die starke Abweichung zu Praxiserfahrungen und die starke Abhängigkeit vom Gießer. Die Ungenauigkeit der Ergebnisse mit der Gießspirale liegt bei ca. $\pm 15\%$. [46]

Bild 4.3 zeigt das Formstoffunterteil einer Gießspirale mit deren Hilfe die Fließ- und Formfülllänge von Schmelzen bestimmt werden kann. Ein entsprechend hergestelltes Gussteil aus Aluminium ist rechts dargestellt.

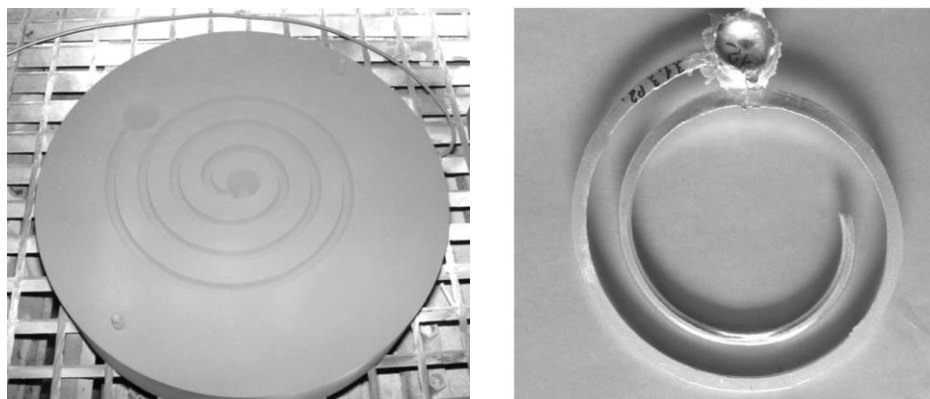


Bild 4.3: Gießspirale aus Formstoff und hergestelltes Gussteil [20; 25; 30; 33; 47; 48]

Bild 4.4 stellt das Phasendiagramm einer AlSi-Legierung und die mit der Gießspirale ermittelten Fließlängen dar [25; 44; 49]. Zur Analyse der legierungsabhängigen Fließlänge wurde in diesem Beispiel eine Überhitzung von 50 °C über der Liquidustemperatur gewählt. Gute Alternativen zur Gießspirale bieten sogenannte Stabkokillen. Diese besitzen einen geraden Gießlauf und eignen sich sehr gut für die Einflussanalyse von Legierungselementen auf die Fließlänge, siehe Untersuchungen von Lang [46] und Englers [50–52]. Die Prüfgenaugigkeit mit der Stabkokille liegt bei ca. $\pm 5\%$ [46; 53]. Weitere Untersuchungsmethoden sind der Gießstab [54], der Vakuumtest, Viskositätsmessgeräte, Gießharfen, Sternproben, kommunizierende Gefäße, Band-Streifen Proben, Doppelspiralen und Flachspiralen [46].

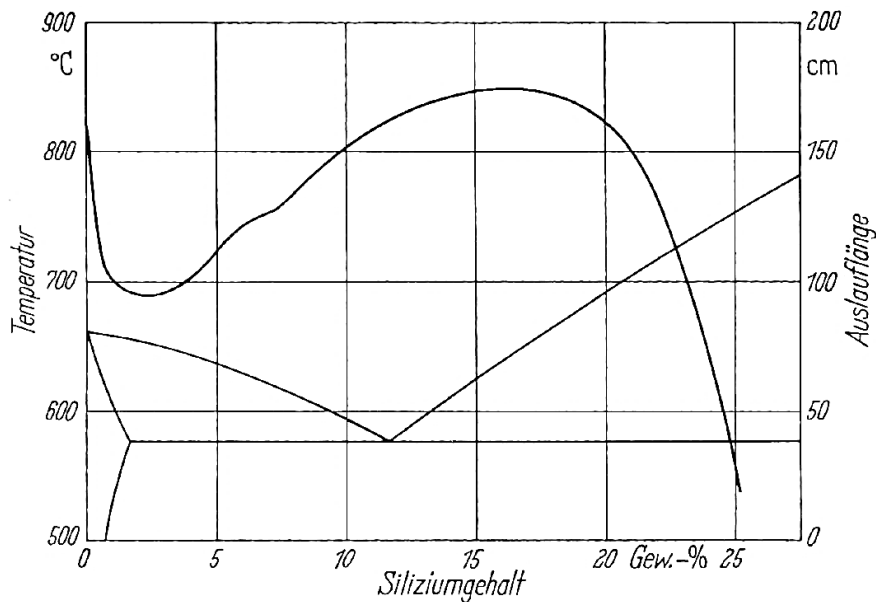


Bild 4.4: Ermittlung der Fließlänge in Abhängigkeit vom Si-Gehalt mit Hilfe der Gießspirale [25; 44; 49]

Die allgemeinen Faktoren, die die Fließlänge einer Schmelze beeinflussen sind die Kokilleneigenschaften, die Legierungseigenschaften und die Gießprozessbedingungen. So nimmt zum Beispiel die Fließlänge mit zunehmender Abkühlleistung der Kokille und mit hohen Wärmeübertragungsraten ab [53; 55]. Wöllmer [56] sagt, dass die Erhöhung der Formtemperatur effektiver ist, als die Erhöhung der Gießtemperatur. Des Weiteren wird die Fließlänge durch die Faktoren Überhitzung und chemische Zusammensetzung bestimmt. Die Überhitzung beeinflusst die Erstarrungsgeschwindigkeit der Schmelze und die chemische Zusammensetzung beeinflusst die Erstarrungsart.

Laut Schröder [54] beruht das Fließen von Schmelzen auf thermodynamischen und strömungsmechanischen Vorgängen sowie deren Wechselwirkungen untereinander. Aus der Benetzung der Kokillenwand mit Schmelze resultiert ein intensiver Wärmeübergang der zu einer raschen Abkühlung und zu einem starken Anstieg der Viskosität führt. Dieser Viskositätsanstieg verzögert die Strömung der Schmelzen in der Kavität und beeinflusst wiederum die instationäre Temperaturverteilung in der Schmelze und den benetzten Kokillenbereichen [54; 57].

Der mathematischen Berechnung der Fließlänge FL haben sich bereits viele Autoren gewidmet [29; 39; 46; 51; 54; 58; 59]. Campbell [59] schlägt für die Berechnung folgenden Ansatz aus Fließdauer $t_{\text{Fließ}}$ und Fließgeschwindigkeit $v_{\text{Fließ}}$ vor:

$$FL = v_{\text{Fließ}} \cdot t_{\text{Fließ}} \quad (4.1)$$

[59]

Die Fließdauer $t_{\text{Fließ}}$ kann mit der Dichte der erstarrten Schmelze ρ_{Schmelze} , der Erstarrungswärme der Schmelze H , dem Wärmeübergangskoeffizient α , der Schmelztemperatur T_{Schmelze} , der Kokillentemperatur T_{Kokille} , dem Gussteilvolumen V und der wärmeabgebenden Oberfläche A wie folgt abgeschätzt werden:

$$t_{\text{Fließ}} = \frac{\rho_{\text{Schmelze}} \cdot H}{\alpha \cdot (T_{\text{Schmelze}} - T_{\text{Kokille}})} \cdot \frac{V}{A} \quad (4.1)$$

[59]

Aus Formel (4.1) ergibt sich für die Fließlänge bei dünnen Gussteilbereichen, in denen der Wärmeübergangskoeffizient α der entscheidende Faktor ist, folgender Zusammenhang:

$$FL = v_{\text{Fließ}} \cdot \frac{\rho_{\text{Schmelze}} \cdot H}{\alpha \cdot (T_{\text{Schmelze}} - T_{\text{Kokille}})} \cdot \frac{V}{A} \quad (4.2)$$

[59]

Für typische, in der Gießereitechnik vorkommende Schmelzen kann die Formel (4.2) mittels der Überhitzungstemperatur $T_{\text{Ü}}$ und der spezifischen Wärmekapazität c wie folgt erweitert werden:

$$FL = v_{\text{Fließ}} \cdot \frac{\rho_{\text{Schmelze}} \cdot (H + (c \cdot (T_{\text{Ü}} - T_{\text{Schmelze}})))}{\alpha \cdot (T_{\text{Schmelze}} - T_{\text{Kokille}})} \cdot \frac{V}{A} \quad (4.3)$$

[59]

Campbell [59] zeigte, dass unter gewissen Vereinfachungen, wie Strömungsform und Erstarrungsmorphologie, die Fließlänge als Funktion der thermischen Eigenschaften, der Kanalgeometrie und der Gießtemperatur mit den bekannten Gesetzen der Wärmeübertragung und der Strömungsmechanik, berechnet werden kann. Hieraus lässt sich ableiten, dass je größer v , ρ_{Schmelze} , c , H , $T_{\text{Ü}}$, T_{Kokille} , V und umso kleiner α und A sind, desto größer ist die Fließlänge. Sind Schmelze- und Kokillentemperatur konstant, ist eine Verbesserung der Fließlänge nur durch eine Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit möglich. Die hier gezeigten Formeln berücksichtigen nicht die Erstarrungsmorphologie, die Benetzbarkeit der Kokille sowie die Oberflächenspannung und Oxidationsneigung der Schmelzen. Im Schwerkraft-Kokillengießen kann die Strömungsgeschwindigkeit $v_{\text{Fließ}}$ in erster Näherung mit der nachfolgenden Formel abgeschätzt werden:

$$v_{\text{Fließ}} = \zeta \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad (4.4)$$

[59; 60]

Aus der Erdbeschleunigung g , der Eingießhöhe h und dem Strömungsbeiwert ζ ergibt sich die Fließgeschwindigkeit der Schmelze. Der Strömungsbeiwert liegt im Bereich von $0 \leq \zeta \leq 1$ und ist abhängig von der Anzahl der Querschnittsübergänge und der Umlenkungen im Gießsystem.

Die Visualisierung von Fließvorgängen beim Kokillen- und Druckgießen sowie beim Gießen mit verlorenen Formen wurden in einigen Arbeiten thematisiert [61–67]. Fleming [61] fertigte eine komplette Kokille aus Glas, um die Strömung der Schmelze zu analysieren. Tscheuschner [63] konzipierte eine Kokille aus Silica-Aerogel. Das Gussteil war ein dreistufiger Keil aus einer AISi-Legierung. Mit Hilfe von Thermographieaufnahmen wurden die Füllung und die Erstarrung dokumentiert und über DAS-Messungen mit der Simulation validiert. Schwam [62] nutzte Röntgenaufnahmen während der Füllung, um diese mit Simulationen zu validieren. Anwendung fand eine Form aus Graphit an Stelle von

Warmarbeitsstahl, um eine Durchstrahlung und Kontrastierung der Schmelze sicherzustellen, vgl. Bild 4.5 links. Larsen [64] untersuchte die Fließvorgänge im Gießen mit verlorenen Formen mit kommunizierenden Kavitäten, vgl. Bild 4.5. Er empfiehlt den Einsatz von temperaturbeständigem Glas, z. B. Pyrex. Aus Kostengründen verwendete Larsen jedoch dreilagiges Standardglas. Die Aufnahmen dienten ebenfalls zur Visualisierung der Schmelzefronten in der Kavität und der Validierung mit der Simulation. Die Untersuchungen zeigten sehr gute Übereinstimmungen bezüglich der Schmelzefronten im Gießsystem sowie bei der Füllung der Gussteilkavitäten. Die gewonnenen Erkenntnisse aus dem Gießen mit verlorenen Formen wurden genutzt, um ein verbessertes Gieß- und Anschnittsystem zur Herstellung von Bremsscheiben zu entwickeln.

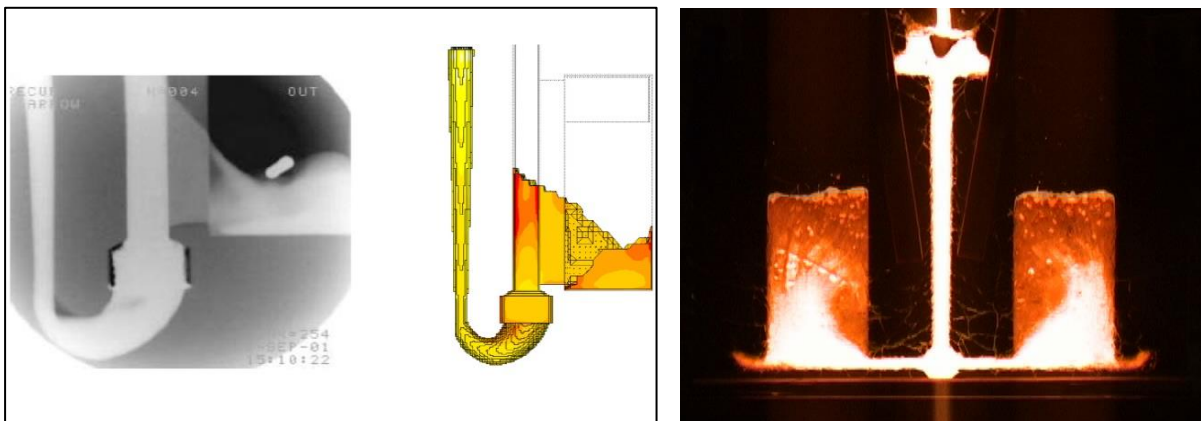


Bild 4.5: Röntgen- und Filmaufnahmen vom Formfüllvorgang zur numerischen Validierung [62; 64]

Jüngsten Untersuchungen aus dem Bereich des Druckgießens zum Thema Visualisierung sind von Fent und Lang. Durch eine Erweiterung des Anschnittsystems war es möglich, eine zweite, gesonderte Kavität auf der Gießmaschine zu installieren. Der Versuchsaufbau ist in Bild 4.6 dargestellt. Dieser ermöglichte es, die einströmende Schmelze mittels Hochgeschwindigkeitsaufnahmen zu dokumentieren und mit entsprechenden Simulationen zu validieren [65; 66].

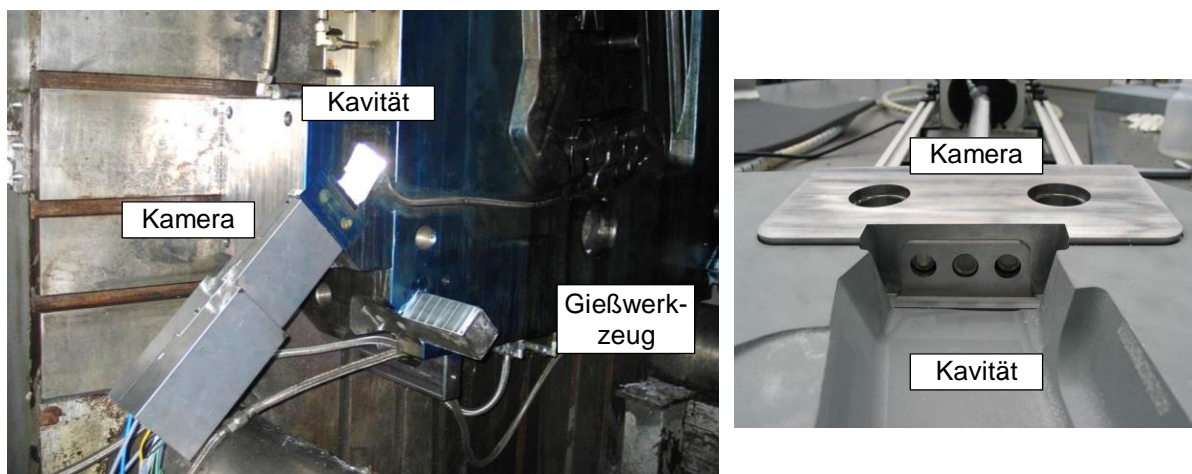


Bild 4.6: Aufbau zur Visualisierung des Fließvorganges mittels Hochgeschwindigkeitskamera [65; 66]

Viskosität von Schmelzen

Die Viskosität ist ein Maß für die Zähflüssigkeit eines Fluides und somit die Folge der inneren Reibung. Hieraus resultieren bei benachbarten Fluidschichten eines strömenden Mediums unterschiedliche Geschwindigkeiten [68]. Die Grundlage zur Bestimmung der Viskosität von Flüssigkeiten bzw. Schmelzen ist das Newton'sche Reibungsgesetz. Für die Mehrzahl der Fluide gilt bei laminarer Strömung [69]:

$$F = \eta A \cdot \frac{dv}{dh} \quad (4.5)$$

[69]

Mit der Schubspannung F/A ergibt sich:

$$\tau = \frac{F}{A} = \eta \frac{dv}{dh} \quad (4.6)$$

[69]

Die dynamische Viskosität beeinflusst das Reibungsverhalten eines Fluids maßgeblich. Das Verhältnis aus dynamischer Viskosität η , abhängig von Druck und Temperatur, und der Dichte ρ ist die sogenannte kinematische Viskosität [69]:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (4.7)$$

[69]

Die Viskosität wurde früher als Maß für die Fließ- und Formfülllänge von Schmelzen herangezogen. Man glaubte, dass allein durch diese Bestimmung, die Fließ- und Formfülllänge beschrieben werden kann [46; 47]. Heute weiß man, dass dies nicht möglich ist. Szalai [68] sagte, dass sowohl die Viskosität, also die inneren Eigenschaften von Schmelzen, als auch die Oberflächeneigenschaften, also Oberflächenspannung und Oxidhautfestigkeit, immer in Kombination betrachtet werden müssen. Ohne den Einfluss der Kokille und dem Vorhandensein von Oxiden und der Wirkung der Oberflächenspannung ist die Fließlänge allein von der Viskosität abhängig [56; 70]. Die Viskosität von Schmelzen ist wiederum von der chemischen Zusammensetzung und der Temperatur abhängig. Dies wurde von Altenpohl [25] und Assael [71] erforscht.

Die Legierungselemente Ti, Cu, Ni, Cr, Mg und Mn verzeichnen bei Aluminiumlegierungen einen Viskositätsanstieg. Im Vergleich dazu reduzieren Si und Zn die Viskosität. Die Temperaturabhängigkeit der Viskosität technischer Legierungen kann mit der von Reinaluminium verglichen werden. [72–74] Von Flemings [61] und Brigas [75] wurde nachgewiesen, dass selbst große Viskositätsunterschiede keinen bedeutenden Einfluss auf die Fließlänge ausüben.

Crepeau [76] beschäftigte sich mit verschiedensten Methoden zur Messung der Viskosität von Schmelzen. Eine der wichtigsten Aussagen der Arbeit war, dass sich eutektische Aluminiumlegierungen wie nicht-newton'sche Fluide verhalten [76; 77].

Mit der dynamischen Viskosität η , der Strömungsgeschwindigkeit v und der Dichte ρ von Schmelzen kann die Reynoldszahl Re der vorherrschenden Strömung in einem entsprechenden Gießkanal mit der charakteristischen Länge l wie folgt berechnet werden [69]:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot l}{\eta} \quad (4.8)$$

[69]

Die Reynoldszahl stellt das Verhältnis der Trägheitskraft und der Reibungskraft dar. Sie dient zur Charakterisierung der jeweiligen Strömungsform. Bei $Re < 2000$ dominieren die viskosen Kräfte und die Strömung bleibt über dem gesamten Strömungsquerschnitt laminar. Ab $Re > 2.300$ treten im Inneren des Strömungsquerschnittes deutlich höhere Strömungsgeschwindigkeiten auf, wodurch erste Turbulenzen entstehen können.

Oberflächenspannung

Die Oberflächenspannung σ ist als die Arbeit W definiert, die zum Aufbau einer Oberfläche A benötigt wird. Diese kann wie folgt beschrieben werden:

$$\sigma = \left(\frac{\delta W}{\delta A} \right)_{T,p} \quad (4.9)$$

[78]

Die Oberflächenenergie ist ein Teil der Anziehungsenergie der Atome. Atome im Fluidinneren werden allseitig von den Nachbaratomen angezogen, wodurch die Gesamtkraft gleich null ist. Bei Atomen an der Oberfläche wirken die Kräfte in Richtung Fluidinneren. Eine Verringerung der Oberfläche entspricht einem Energiegewinn, welcher die Ursache der Oberflächenspannung ist. Bei gegebenen Volumen hat die Kugel das optimale Volumen-Oberflächenverhältnis [78].

Zur Bestimmung der Oberflächenspannung ohne Oxidhaut hat sich nach Altenpohl [25] die Blasen-druckmethode als probates Mittel erwiesen. Dabei wird unterhalb des Schmelzespiegels eine Gasblase (Argon) erzeugt und die Schmelze in der Kapillare nach oben gedrückt. Die ermittelte Höhe wird zur Berechnung der Oberflächenspannung herangezogen. Die Oberflächenspannung von Reinaluminium bei 700 °C ohne Oxidhaut beträgt ca. 0,85 N/m [25]. Laut Flemings [61; 79] hat die Oberflächenspannung einer Schmelze nur unter ganz bestimmten, in der Praxis selten vorkommenden, Bedingungen einen nennenswerten Einfluss auf die Fließlänge. Er bezieht seine Erkenntnisse auf sehr kleine Gießkanalquerschnitte und Strömungsgeschwindigkeiten unter 1,0 m/s. Korolkow [80] fand heraus, dass selbst durch eine deutliche Verringerung der Oberflächenspannung beim Aluminiumgießen, kaum Verbesserungen bei der Fließlänge erzielt werden können. Die Energie, die zur Verringerung der Oberflächenspannung der Schmelze beim Fließen überwunden werden muss, ist relativ gering. Sie beträgt laut Patterson [44] nur ein Sechstel der Gesamtenergie.

In dünnwandigen Gussteilen ist das Volumen-Oberflächenverhältnis sehr ungünstig. In diesen Bereichen spielt die Oberflächenspannung der Schmelze eine entscheidende Rolle. Ohne diese können Störeinflüsse zur Wellenbildung und Oberflächenturbulenzen führen, wodurch sich das Volumen-Oberflächenverhältnis weiter verschlechtert. Das Aufbrechen der Strömungsfront kann anhand der Weberzahl We berechnet werden. Diese setzt sich aus der Dichte ρ , der Oberflächenspannung σ , der

Strömungsgeschwindigkeit v der Schmelze sowie dem Radius der Oberflächenkontur r zusammen und kann wie folgt formuliert werden:

$$We = \frac{\rho \cdot v^2 \cdot r}{\sigma} \quad (4.10)$$

Hierbei gelten Weberzahlen von $We > 0,8$ als Grenzwert. Beim Überschreiten ist mit dem ersten Auftreten von Oberflächenturbulenzen zu rechnen [59; 81]. Die Oberflächenspannung von Aluminium unterdrückt diese Effekte maßgeblich, wodurch auch dünnwandige Gussteilbereiche bei sonst unkontrollierten Formfüllungsvorgängen turbulenzfrei vergossen werden können. Somit können die sonst empfohlenen maximalen Strömungsgeschwindigkeiten (max. 1,0 m/s) ohne Risiko der Oberflächenturbulenz deutlich überschritten werden [59; 68].

Campbell [40] fasste die Erkenntnisse über die Ausbildung der Strömungsformen in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit und der Gießkanalgeometrie zusammen, siehe Bild 4.7. Er unterscheidet zwischen den Strömungsbedingungen in der Schmelze (Innere Strömung - Bulk flow) und den Strömungsbedingungen an der Schmelzefront (äußere Strömung - Surface flow). Die grafische Ausarbeitung kann sowohl für das Kokillengießen als auch für das Druckgießen angewendet werden.

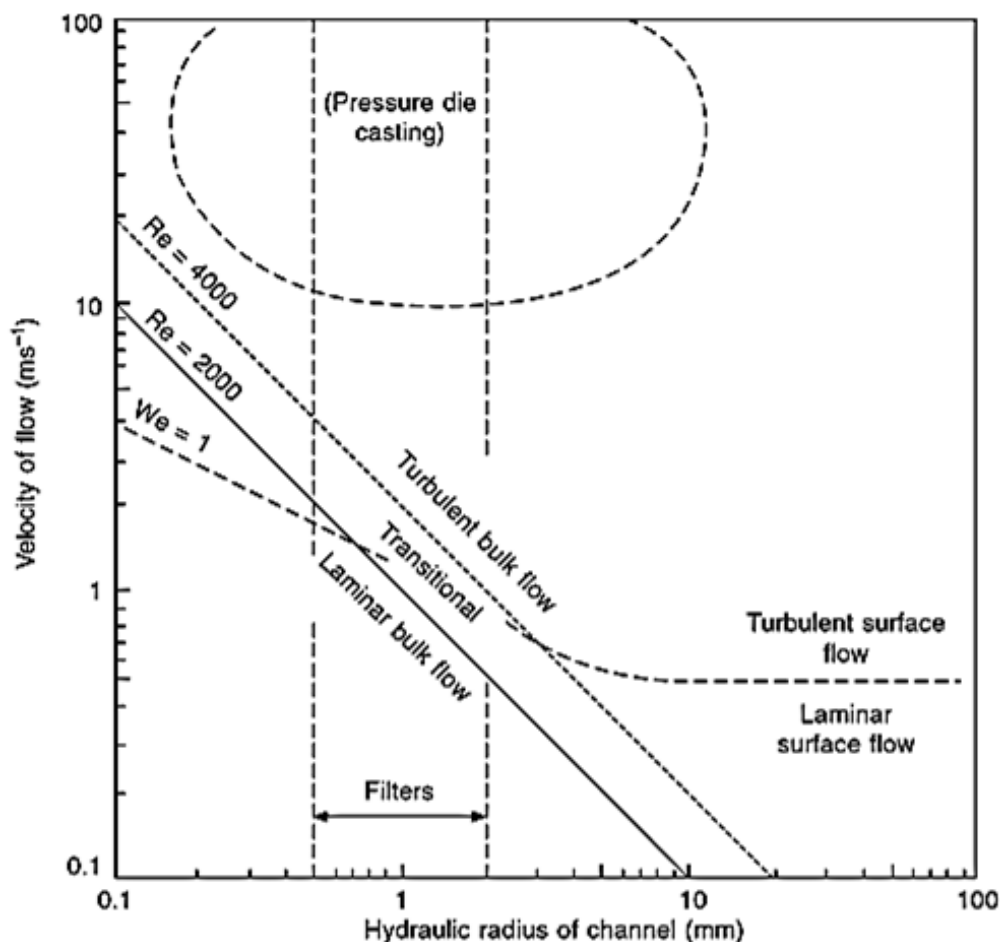
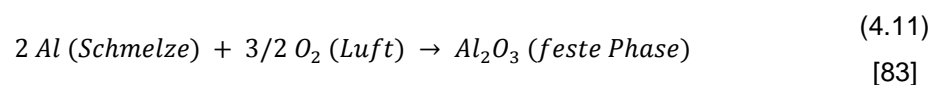


Bild 4.7: Ausbildung der Strömungsformen und deren Abhängigkeiten nach Campbell [40]

Unter Berücksichtigung der physikalischen Gegebenheiten kann im Kokillengießen vorrangig eine laminare bis transitionale Strömung angenommen werden. Während des Eingießvorgangs beim Schwerkraft-Kokillengießen ist im Gieß- und Anschnittsystem mit einer turbulenten Strömung zu rechnen. Diese Annahmen decken sich mit entsprechenden Colebrook-Diagrammen, vgl. Bild 10.3 im Anhang B. Bei Reynoldszahlen $Re < 3.000$ kann davon ausgegangen werden, dass bei geschichteten Kokillenoberflächen mit typischerweise auftretenden Rauheiten (Rohrreibungszahl $0,1 \leq \lambda \leq 0,5$) in der Randzone der Schmelze laminare Verhältnisse vorherrschen.

Oxidhaut

Die Zusammensetzung und das Verhalten von Oxidhäuten ist wiederholt untersucht und als sehr komplex eingestuft worden. Die Oxidationsneigungen von Metallen können sogenannten Ellingham-Diagrammen entnommen werden, siehe [59]. Die freie Reaktionsenthalpie von Aluminiumoxid ist sehr hoch ($\Delta H^{\circ}1020 = -1697 \text{ J}\cdot\text{Mol}^{-1}$) und bewirkt eine starke Oxidation der Schmelze mit dem Luftsauerstoff [82]. Die Reaktion kann folgendermaßen beschrieben werden [83]:



Die Kinetik der Oxidhautbildung bei Aluminiumlegierungen ist sehr hoch. Flüssiges Aluminium oxidiert unter Atmosphäre aufgrund der freien Reaktionsenthalpie laut Crepeau [84] in Millisekunden. Campbell [59] und Bandykhan [85] führten Messungen an gezüchteten Aluminiumoxiden in einem Warmhalteofen durch und ermittelten folgende Oxidationsgeschwindigkeit:

$$\text{Oxidationsgeschwindigkeit} \approx 10^{-10} \text{ bis } 7 \cdot 10^{-7} \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$$

Das unter Atmosphäre entstandene, bei rund 2050 °C schmelzende Al_2O_3 , liegt beim Aluminiumgießen immer in fester Form vor und kann durch Desoxidation (Reduktion) nicht beseitigt werden [86]. Die Wachstumsgesetze der Oxidhäute sind laut Grizincic noch nicht eindeutig geklärt [87]. Bekannt ist, dass Reinaluminiumschmelzen die dichteste und undurchlässigste Oxidhaut mit der höchsten Oxidhautfestigkeit besitzen. Durch unedlere Legierungselemente, wie Mg, Ca, Sr oder Na, kann die Dicke der Oxidhautbildung stark erhöht werden [88]. Grund hierfür ist die undichte Deckschicht aus Mischoxiden mit hohem Sauerstoffanteil [25; 87]. Die Elemente Si, Cu, Zn, Fe und Zn haben laut bisherigen Untersuchungen keinen Einfluss auf die Oxidationsgeschwindigkeit [88].

Die Art der Ausbildung des Aluminiumoxides wird durch sein Alter bestimmt. Wachstumsdauern und entsprechende Oxidhautdicken können Anhang C entnommen werden. Es wird zwischen jungen und alten Oxiden unterscheiden. Junge Oxide sind besonders duktil und können dementsprechend ohne Aufreißen große Verformungen ertragen. Die auf der Oberfläche des Gießstrahles erkennbare Oxidhaut gehört zu dieser Gruppe. Erreicht die Oxidhaut ein kritisches Dicken- bzw. Festigkeitsniveau, die keine Verformung mehr erträgt, wird die Oxidhaut bei Erreichen eines kritischen Druckes lokal aufge-

rissen [68]. Campbell [40; 59] und Bangyikhan [85] sagen, dass das Aufreißen der Oxidhaut durch mechanische Spannungen (Abkühlung der Schmelze, Aufsteigen von Blasen, Abkrätzen etc.) oder durch die Umwandlung der Kristallstruktur ($\gamma \rightarrow \alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) hervorgerufen wird, vgl. Bild 4.8.

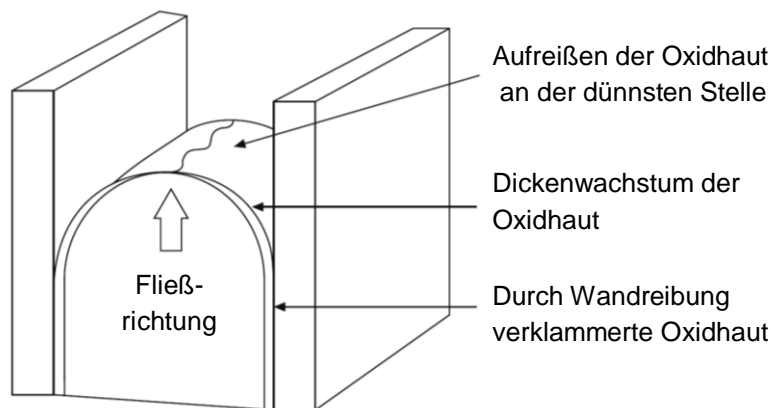


Bild 4.8: Schematisches Aufreißen der Oxidhaut an der Schmelzefront nach Campbell [40]

Agakwu [89] hat sich mit der Vermessung von Oxidstrukturen und Oxiddicken beschäftigt. Er fand heraus, dass es nur einen geringen Zusammenhang zwischen der Oxidfestigkeit und der Dicke der Oxidhaut gibt. Die Kraft um eine 1 μm dicke $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ -Oxidhaut bei 950 °C zu zerreißen, beträgt zwischen 23 und 42 MPa [89].

Szalai [68] beschreibt in seiner Arbeit die Kombination von Oxidhaut und Oberflächenspannung wie folgt: Während des Fließens wird die Oberfläche der Schmelze stetig vergrößert. Die zu überwindenden Hindernisse sind die Oxidhaut und die Oberflächenspannung. Hierbei muss die Oxidhaut zerrissen ($E_{\text{oxid}} = R_{\text{moxid}} \cdot A_{\text{oxid}} \cdot \Delta x$) und anschließend die Oberfläche ausgedehnt werden ($E_{\text{ob}} = \sigma \cdot \Delta A$). Die Arbeit zum Aufreißen der Oxidhaut hat dabei keine Beziehung zu der Oberflächenarbeit und übt seine Wirkung entsprechend nur bis zur Duktilität des Oxids aus. Da die Bildungsgeschwindigkeit der Oxidhaut, im Vergleich zur Strömungsgeschwindigkeit der Schmelze, um Größenordnungen weniger Zeit beansprucht, kann das Vorhandensein einer Oxidhaut, laut Szalai [68] als kontinuierlich angesehen werden. Die Theorie von Szalai wird von in der Literatur auffindbaren Untersuchungen bestätigt. Herrmann [90] schrieb über eine AlSi12-Legierung, dass die hohe Oberflächenspannung durch die Bildung der Oxidhaut verdoppelt wurde. Auch Loper [91] berichtete über Anstiege von 100 %. Mit dem Messprinzip des „Hängenden Tropfens“ ermittelte Szalai für die AlSi12Cu4Ni2Mg-Legierung einen Anstieg von 75 %.

Der Einfluss der Oxidhaut und deren Festigkeit auf die Fließlänge wurden bereits umfangreich untersucht. Die allgemeine Aussage ist stets, dass sich die Oxidation, fälschlicherweise oft als Oberflächenspannung bezeichnet, schädlich auf die gießtechnologischen Eigenschaften von Aluminiumschmelzen auswirkt [33; 56; 68]. Der Verein deutscher Hüttenschmelzen gibt an, dass mit Oxiden suspendierte Aluminiumschmelzen deutlich dickflüssiger sind, wodurch ein Rückgang der Fließlänge zu verzeichnen ist [92]. Diese Erkenntnisse konnte von Shabestari [93] bestätigt werden.

Szalai [68] vergoss Aluminium unter Argon-Atmosphäre mit verschiedensten O_2 -Konzentrationen und erreichte eine Fließlängensteigerung im Kokillengießen von +7 %. Laut den Untersuchungen reichte

bereits eine Argon-Konzentration von 20 Vol.-% in der Atmosphäre, um die maximale Fließlänge zu erreichen. Er begründete die Steigerung durch das Herabsetzen der Oxidationsgeschwindigkeit der Aluminiumschmelze. Zur Sicherstellung, dass der Luftsauerstoff aus der Kavität vollständig verdrängt wird, empfiehlt Szalai mindestens das 6-fache des Gussteilvolumens zur Schutzgasspülung zu verwenden. Idealerweise sollte eine Strömungssimulation mit Argon durchgeführt werden, um etwaige „Totwassergebiete“ zu identifizieren, um je nach Größe und Komplexität der Gussteilkavität die Schutzgasspülung bedarfsgerecht anzupassen [68].

Benetzung und Oberflächenrauheit

Das Benetzungsverhalten zwischen Kokillenoberfläche und Schmelze spielt eine entscheidende Rolle für die Fließlänge. Das Benetzungsverhalten bzw. die resultierenden Benetzungswinkel werden primär durch die Oberflächenrauheit bestimmt [94]. In vielen Bereichen der Ingenieurwissenschaften wird versucht, durch eine gezielte Oberflächentopographie hydrophobe, antiadhäsive, reibungsoptimierte oder antistatische Eigenschaften zu erreichen. Das Benetzungsverhalten von Oberflächen lässt sich durch die zwei Zustände *Cassie-Baxter* oder *Wenzel* beschreiben, vgl. Bild 4.9. Wie aus der Abbildung zu erkennen ist, ist der Benetzungswinkel stark von der Oberfläche abhängig. Der Idealzustand für hydrophobe Oberflächeneigenschaften wird durch den *Cassie-Baxter*-Zustand erreicht.

Im Bereich der Gießereitechnik analysierte Gierth [94] den Einfluss der Oberflächenrauheit ($2 \mu\text{m} \leq R_z \leq 100 \mu\text{m}$) auf das Benetzungsverhalten einer AISI11Mg Legierung im Labormaßstab. Mit der Methode des „liegenden Tropfens“ ergaben sich unter Argon-Atmosphäre Benetzungswinkel zwischen 130° und 180° . Gierth bestätigt mit seinen Untersuchungen die allgemein bekannte Aussage, je rauer die Oberfläche, desto höher ist der Benetzungswinkel zwischen der Schmelze und der Oberfläche. Gierth zeigte auf, dass durch eine entsprechende Oberflächenrauheit die Fließlänge von Aluminiumlegierungen um bis zu +150 % verbessert werden kann [94].

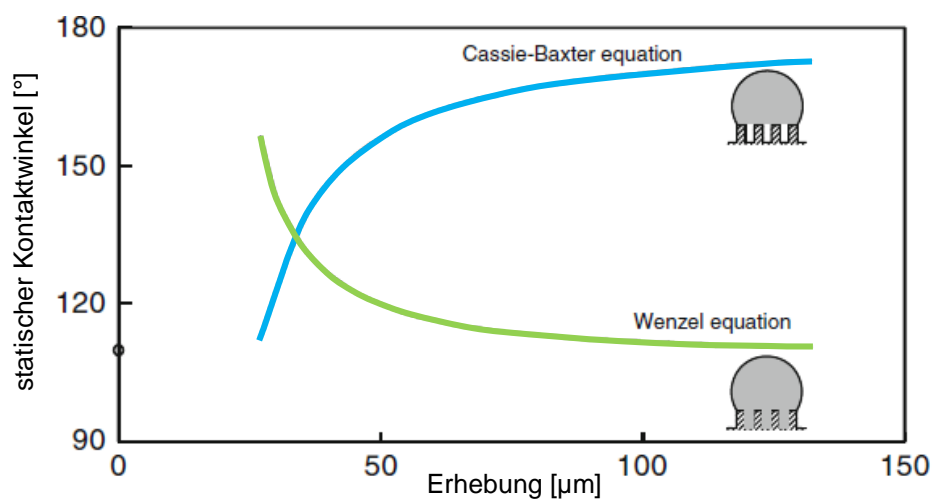


Bild 4.9: Cassie-Baxter und Wenzel Zustand bezogen auf Kontaktwinkel und Strukturabstand [95]

4.2.1.3 Zusammenfassung und Bewertung der Einflussgrößen

Tabelle 4.1 zeigt zusammengefasst die wichtigsten Einflussfaktoren auf die Fließlänge für Aluminiumlegierungen sowie eine Bewertung. Bekanntermaßen üben die Gießtemperatur und die Geschwindigkeit einen entscheidenden Einfluss auf die Fließlänge aus. Jedoch spielen auch die Oberflächentopografie und das Benetzungsverhalten zwischen Schmelze und Kokille eine wichtige Rolle.

Tabelle 4.1: Einflussgrößen auf die Fließlänge bei AlSi-Legierungen

| Einflussgröße | Einschränkung | Bemerkung | Bewertung Einflussgröße | Quelle |
|--|----------------------|----------------------------------|--------------------------------|---------------|
| Gießtemperatur | - | - | hoch | [96] |
| Geschwindigkeit | > 1,0 m/s | - | hoch | [59] |
| Si-Gehalt | 5 - 12 Gew.-% | - | mittel | [25; 44; 49] |
| Viskosität | 0,001 - 0,002 Pa·s | - | gering | [61; 75] |
| Kornfeinung, H ₂ -Gehalt | - | - | gering | [96] |
| Oberflächenspannung | 0,8 - 1,6 N/m | bei dünnen Wandstärken schwierig | mittel | [61; 79; 80] |
| Oxidhaut | - | +7 % FL | gering | [68] |
| Rauheit R _z [µm] | 50 - 100 µm | ohne Schlichte | hoch | [94] |
| Benetzungswinkel | 130° - 180° | ohne Schlichte | hoch | [94] |

4.2.2 Formfüllungsvermögen

4.2.2.1 Definition

Das Formfüllungsvermögen kann wie folgt definiert werden: „*Unter Formfüllungsvermögen versteht man die Fähigkeit eines Gießmetalls, die Konturen der Gießform wiederzugeben.*“ [29]

Das bedeutet, bei geringen Formfüllungsvermögen kommt es zur unvollständigen Abbildung feiner Partien, wie Ecken und Kanten, da die Schmelze in die entsprechenden Bereiche nicht eindringen kann. Das Formfüllungsvermögen ist von den thermischen Bedingungen der Kokille, der Schmelze sowie von den Oberflächeneigenschaften und der Erstarrungsmorphologie abhängig.

4.2.2.2 Bisherige Untersuchungen

Zur Ermittlung des Formfüllungsvermögens gibt es die verschiedensten Kokillenkonzepete. Die bekanntesten sind Bolzen-, Kegel-, Kugel- und Keilkokillen [44; 51; 97]. Bild 4.10 zeigt das Gussteil aus einer Bolzenkokille mit entsprechender Auswertung. Die Besonderheit der Bolzenprobe ist das Gießen von Schmelze zwischen zwei zylindrische Körper. Durch die Verjüngung verengt sich der Kanalquerschnitt, wodurch das Eindringen der Schmelze erschwert wird.

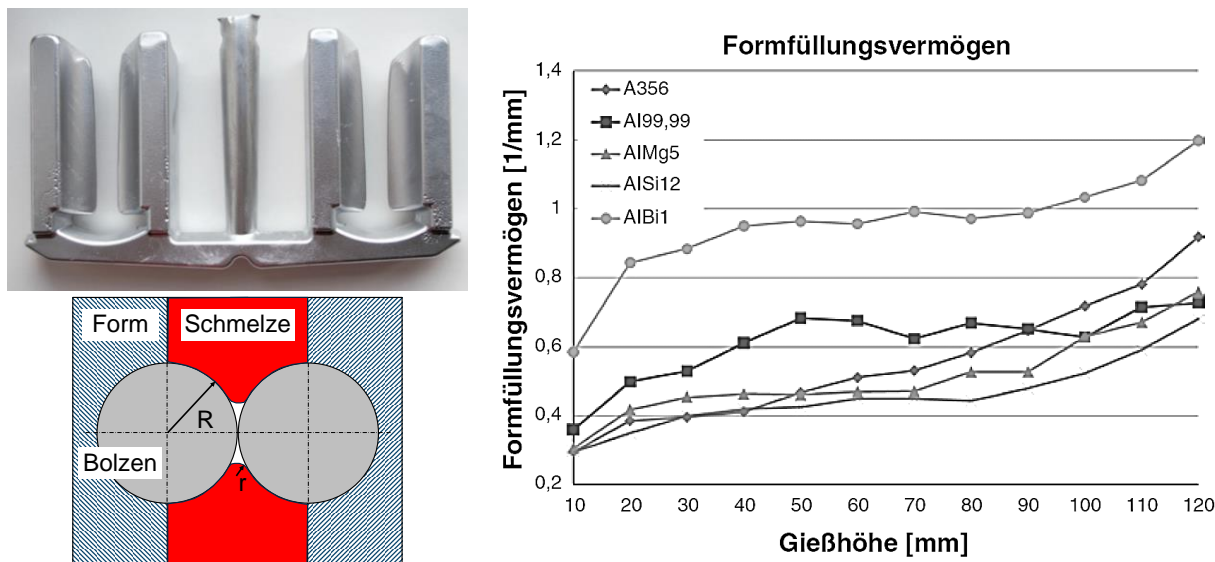


Bild 4.10: Gussteil aus einer Bolzenkokille (links) [20] sowie Auswertung (rechts) [98]

Das Formfüllungsvermögen ist von der Dichte, der Oberflächenspannung und vom Gießdruck abhängig [39; 50]. Ellerbrok [50] konnte in seinen Untersuchungen mit der Bolzenprobe nachweisen, dass es einen einfachen Zusammenhang zwischen Kantenradius r , Oberflächenspannung σ und der metallostatischen Druckhöhe h gibt. Die Beziehung zur Bewertung des Formfüllungsvermögens FFV wurde durch Ellerbrok [50] wie folgt definiert:

$$FFV = \frac{1}{r} = \frac{\rho \cdot g \cdot h}{\sigma} \tag{4.12}$$

[50; 78]

Entsprechend kann mit zunehmenden Gießdruck und Dichte sowie abnehmender Oberflächenspannung der Schmelze das Formfüllungsvermögen verbessert werden. Die Formel (4.13) wird als Laplace-Druckgleichung bezeichnet und ergibt sich zu:

$$P_i - P_e \geq \sigma \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \tag{4.13}$$

[78]

Dabei sind r_1 und r_2 die Hauptkrümmungsradien des Oberflächenelementes. Der Krümmungsdruck ist umso größer, je kleiner die beiden Krümmungsradien sind. Für eine Kugeloberfläche ergibt sich mit $r_1 = r_2 = r_k$:

$$p_L = 2 \cdot \frac{\sigma}{r_k} \tag{4.14}$$

[78]

Die Berechnungen beziehen sich auf den Idealzustand einer Schmelze, wodurch Einflussfaktoren wie Vorerstarrung und Oxidhautbildung nicht berücksichtigt werden. Szalai [68] empfiehlt diese Einflussfaktoren durch eine Verdopplung der Druckhöhe zu kompensieren. Ein geringes Formfüllungsvermögen wird bei feinen Strukturen und Hinterschnitten erreicht. Eingeschlossene Lufttaschen verhindern das Eindringen der Schmelze. Die Luft wird durch den Druck komprimiert, bis sich ein Druckgleichge-

wicht einstellt. Anhand dieses Gleichgewichtes stellt sich die entsprechende Gussteilkontur ein [68], vgl. Bild 4.11. Wöllmer [56] greift in seiner Arbeit diesen theoretischen Ansatz auf, um metallische Mikro-Präzessionsgussteile im Schleudergießen herzustellen.

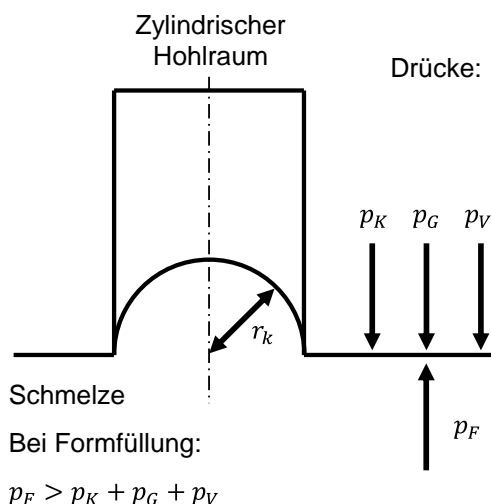


Bild 4.11: Druckgleichgewicht am Ende der Formfüllung nach [56]

Wie in Bild 4.12 dargestellt, ermittelten Kölling [39], Ellerbrok [50] und Englers [51] die Zusammenhänge zwischen Gießtemperatur, Gießdruck und dem resultierenden Formfüllungsvermögen verschiedener Schmelzen. Sie erkannten, dass das Formfüllungsvermögen direkt vom metallostatistischen Druck abhängig ist. Bei allen Untersuchungen stellten sie fest, dass die Gießtemperatur zunächst einen sehr geringen Einfluss ausübt und erst bei zunehmender Druckhöhe stärker wird. Die Temperaturabhängigkeit der Viskosität und der Oberflächenspannung ist im Erstarrungsintervall am stärksten ausgeprägt. Die einsetzende Erstarrung verschlechtert das Formfüllungsvermögen schlagartig. Im idealflüssigen Bereich der Schmelze ist das Formfüllungsvermögen unabhängig von der Temperatur.

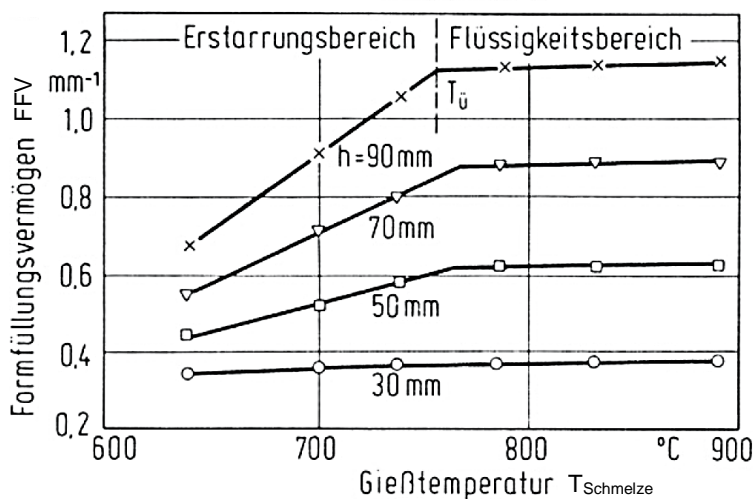


Bild 4.12: Formfüllungsvermögen in Abhängigkeit von der Gießtemperatur und der Druckhöhe [51]

Brunhuber [99] analysierte eutektische Legierungen (AlCu, AlMg, AlZn, AlSi), die erfahrungsgemäß zähflüssiger sind. Er fand heraus, dass trotz Viskositätsanstieg in Richtung eutektischer Zusammensetzung, die Legierungen hoch formfüllfähig sind. Das Formfüllungsvermögen von AlSi-Legierungen wurde ebenso von Lang [46] und Engler [52] untersucht. Sie kamen zu der Erkenntnis, der Si-Gehalt übt keinen nennenswerten Einfluss aus. Szalai [68] und Obuna [100] sagten, dass das Vorhandensein einer Oxidhaut auf der Schmelzoberfläche eine Verschlechterung des Formfüllungsvermögens bewirkt. Szalai formulierte den Zusammenhang wie folgt: Feine Konturen, wie Ecken und Kanten können durch die auf der Schmelze befindlichen Oxidhaut nicht abgebildet werden. Hierzu bedarf es dem Aufreißen der Oxidhaut, sodass unoxidierte Schmelze in die filigranen Konturen eindringen kann. Je fester die Oxidhaut, umso höher ist die benötigte Kraft. Ist die kinetische Energie oder der metallostatistische Druck zu gering, können die feinen Konturen nicht abgebildet werden.

Bild 4.13 stellt die beschriebenen Einflüsse wie Oberflächenspannung, Viskosität und Si-Gehalt auf das Formfüllungsvermögen von Aluminium dar. Man erkennt, dass die Legierungszusammensetzung im Bereich von 5 bis 11 Gew.-% Si nur einen geringen Einfluss auf das Formfüllungsvermögen ausübt.

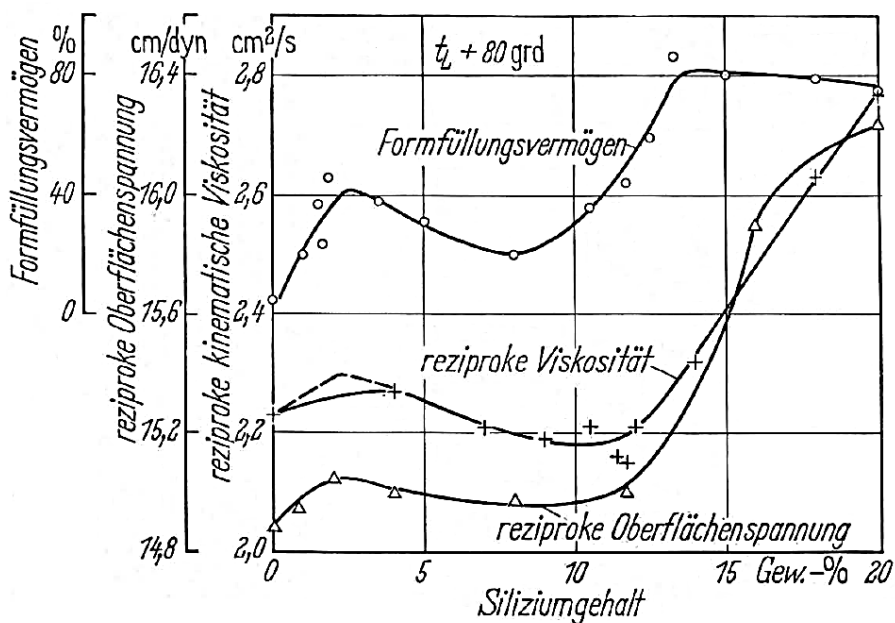


Bild 4.13: Formfüllungsvermögen, Oberflächenspannung und Viskosität im System AlSi [25; 44]

Polianska [38] entwickelte den sogenannten Gießindex G aus dem Fließvermögen und dem Formfüllungsvermögen, vgl. (4.15):

$$G = FL \times FFV \quad (4.15)$$

[38]

Sie sagt, dass für das Fließvermögen die Viskosität also die Reynoldszahl, vgl. Formel (4.8) und für das Formfüllungsvermögen die Oberflächenspannung also die Weberzahl, vgl. Formel (4.10), maßgebend sind.

$$FL = c_1 \cdot Re \quad (4.16)$$

$$FFV = c_2 \cdot We \quad [38; 48]$$

Mit den legierungsunabhängigen Skalierungsfaktoren $c_1 = 10^{-3}$ und $c_2 = 1$ kann der Gießindex G bestimmt und somit das Gießvermögen von Aluminiumlegierungen abgeleitet werden [38; 48].

4.2.2.3 Zusammenfassung und Bewertung der Einflussgrößen

Tabelle 4.2 zeigt zusammengefasst die wichtigsten Einflussgrößen auf das Formfüllungsvermögen bei Aluminiumlegierungen sowie eine entsprechende Bewertung. Die wichtigsten Einflussgrößen sind die Geometrie, der wirkende Druck und die Oberflächenspannung.

Tabelle 4.2: Einflussgrößen auf das Formfüllungsvermögens bei AlSi-Legierungen

| Einflussgröße | Einschränkung | Bemerkung | Bewertung Einflussgröße | Quelle |
|----------------------|----------------------|-----------------------------|------------------------------------|---------------|
| Geometrie | 0,1 mm - 2,0 mm | $F=1/r$ Entlüftung nötig | hoch | [68; 50] |
| Druck | - | - | hoch | [50] |
| Si-Gehalt | 7 bis 12 Gew-% | - | gering | [46; 52] |
| Temperatur | < 740 °C | - | hoch | [39; 50; 51] |
| | > 740 °C | idealflüssig | niedrig | [39; 50; 51] |
| Oberflächenspannung | - | - | hoch | [39; 50; 51] |
| Oxidhaut | - | - | mittel | [68; 100] |

4.2.3 Erstarrung und Erstarrungsmorphologie

Unter Erstarrungsmorphologie versteht man das Verhalten der wachsenden Kristalle während der Erstarrung von Schmelzen. Die Erstarrung hat eine direkte Beziehung zum Fließ- und Formfüllungsvermögen. Beim Erstarrungsvorgang bilden sich Kristalle an der Kokillenwand (exogen) oder im Inneren der Schmelze (endogen). Beim weiteren Wachstum bleiben sie kompakt oder verzweigen sich. Hierbei muss beim Fließen und Erstarren zwischen reinen, niedrig- und hochlegierten Schmelzen unterschieden werden. Der Vorgang für eine reine Schmelze ist in Bild 4.14 links dargestellt.

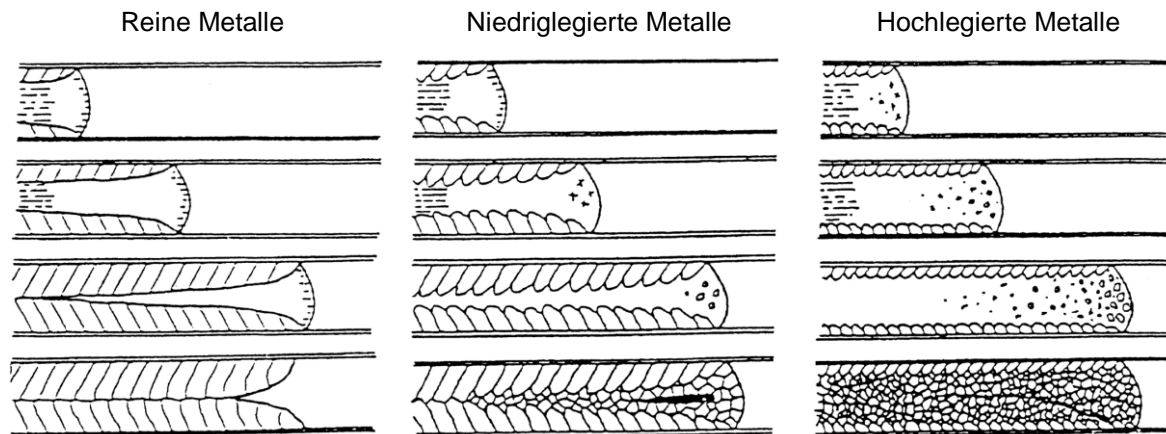


Bild 4.14: Die Erstarrungsmorphologien im Überblick [101; 102]

Reine Schmelzen weisen kein Erstarrungsintervall auf. Sie erstarren bei der Erstarrungstemperatur. Die exogen gebildeten Kristalle wachsen säulenförmig, ausgehend von den Kokillenwänden, in Richtung der Gießkanalmitte. Dies ist dem Temperaturgradienten und dem gerichteten Wärmestrom, von der Schmelze zur Kokille, geschuldet. Die Grenzfläche zwischen fester und flüssiger Phase ist glattwandig. Die Strömung der Schmelze erfolgt durch den sich stetig verengenden Gießkanal, bis diese komplett erstarrt ist. Dies ist der Grund, dass reine Schmelzen ein hohes Fließvermögen besitzen [64; 103; 104]. Die Schwindung von Reinaluminium kann beim Liquidus-Solidus-Punkt (ca. 660 °C) mit ca. 7 % beziffert werden [92].

Das Fließen und Erstarren einer niedriglegierten Schmelze mit geringem Erstarrungsintervall in einem schmalen Gießkanal ist in Bild 4.14 Mitte dargestellt. Wie bei reinen Schmelzen beginnt die Erstarrung an der Kokillenwand. Die sich bildenden Erstarrungsfronten sind rau und stellen einen signifikanten Strömungswiderstand durch Reibung zwischen flüssiger und fester Phase dar. Parallel dazu erstarren feine Körner an der Schmelzefront. Diese auftretenden Mechanismen führen zu einer deutlichen Abnahme der Fließlänge der Schmelze. Aufgrund des erstarrten Gießkanals resultieren Schwindungsporositäten nahe der Schmelzefront [59].

Bei hochlegierten Schmelzen bilden sich ausgehend von den Kokillenwänden säulenförmige Körner. Der Großteil der Erstarrung setzt im Gießkanalquerschnitt ein. Dies trifft zum Beispiel auf übereutektische Aluminiumlegierungen zu. Die sich bildenden Körner werden von der strömenden Schmelze mitgerissen, wodurch sich die Viskosität stetig erhöht. Wird eine kritische Konzentration an der Schmelzefront erreicht, kommt diese zum Erliegen. Dies kann bereits oberhalb der Solidustemperatur, bei einem Festphasenanteil von 50 % erfolgen [81; 105; 106]. Im Vergleich zu reinen Metallen ist die Fließlänge deutlich reduziert [104]. Zudem treten Schwindungsporositäten in den zuletzt erstarrten Bereichen auf, vgl. Bild 4.14 rechts [54]. Durch das Legierungselement Silizium und dessen 10 %ige Expansion kann die 7 %ige Schwindung des Reinaluminiums auf bis zu 4 % reduziert werden [92].

Ein Großteil der Aluminiumguss-Legierungen erstarrt dendritisch. Die Anzahl der Dendriten ist abhängig von der Anzahl der Kristallisatoren in der Schmelze und an der Kokillenwand. Die Abstände der Primärdendriten werden als λ_1 und die der Dendritenarme als λ_2 bezeichnet, vgl. Bild 4.15 [107].

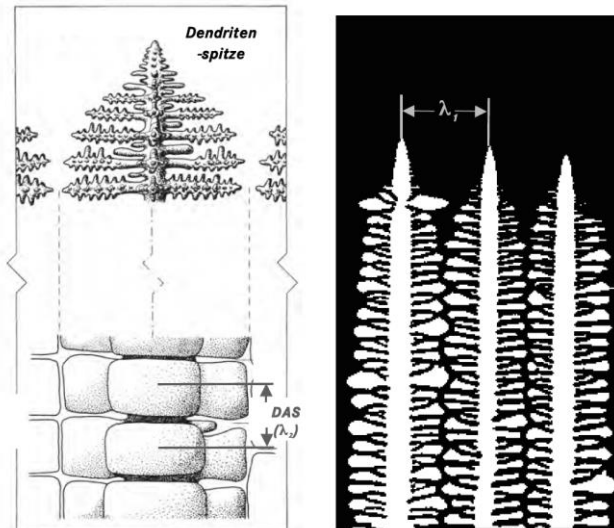


Bild 4.15: Aufbau eines Dendriten mit der Dendritenspitze und den Dendritenarmen [107]

Der Abstand zwischen den benachbarten Dendriten wird als Dendritenarmabstand bezeichnet. Die Abstände werden von der lokalen Erstarrungsdauer gesteuert. Der mathematische Zusammenhang zwischen dem λ_2 -Wert, der Erstarrungsdauer t_s und der spezifischen Werkstoffkonstante k kann wie folgt beschrieben werden:

$$\lambda_2 = k \cdot \sqrt[3]{t_s} \quad (4.17)$$

[107]

Bei langen lokalen Erstarrungsdauern können einzelne Arme wieder aufschmelzen, wodurch sich die Abstände weiter vergrößern. Das Verzweigen der Dendritenarme kommt zum Stillstand, wenn sich die Diffusionsfelder von den Dendritenarmspitzen überlagern [107]. Beispiele für die werkstoffabhängige Konstante k können der Tabelle 4.3 entnommen werden.

Tabelle 4.3: Werte für die Legierungskonstante k von Aluminiumlegierungen [107]

| Legierung | k [$\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1/3}$] | Erstarrungsintervall [K] |
|-----------|---|--------------------------|
| AlSi5Mg | 11,5 | 70 |
| AlSi7Mg | 11,0 | 55 |
| AlSi10Mg | 10,4 | 45 |

Das Gießmodul M , oder einfach nur Modul genannt, beschreibt in der Gießereitechnik das Verhältnis aus dem Schmelzevolumen pro wärmeabgebender Oberfläche wie folgt:

$$M = \frac{V}{A} \quad (4.18)$$

[23; 108]

Typischerweise wird das Modul angewendet, um die Dichtspeisung eines Gussteilbereiches zu berechnen. Hierbei muss das Modul des Speisers größer bemessen sein, als des zu speisenden Gussteilbereiches. Mit Hilfe des Moduls kann die Erstarrungsdauer von Gussteilbereichen oder Speisern berechnet werden. Das sogenannte *Wurzel-t-Gesetz* wurde 1940 von N. Chvorinov aufgestellt. Mit dem metall-, temperatur- und formstoffabhängigen Koeffizienten k und dem Exponenten $1,5 < n < 2,0$ ergibt sich die Erstarrungsdauer t_s zu:

$$t_s = k \left(\frac{V}{A} \right)^n \quad [min] \quad (4.19)$$

Der Koeffizient k kann mit der Formel (4.20) wie folgt berechnet werden [108]:

$$k = \left[\frac{p_s \cdot H}{T_l - T_K} \right] \cdot \left[\frac{\pi}{4 \cdot \lambda \cdot \rho \cdot c_K} \right] \cdot \left[1 + \left(\frac{c_s \cdot \Delta T_{\dot{U}}}{H} \right)^2 \right] \quad (4.20)$$

Bisher erfolgte stets die Beschreibung der Erstarrungsvorgänge seitens der Aluminiumschmelze. Jedoch übt im Kokillengießen die metallische Dauerform aus Warmarbeitsstahl mit dessen thermophysikalischen Eigenschaften einen massiven Einfluss auf die Erstarrungsgeschwindigkeit, -richtung und -morphologie aus. Beim Eintritt der Schmelze in einen Gießkanal bildet sich sofort eine dünne, erstarrte Randschicht. Dies resultiert aus dem Temperaturgradienten zwischen der Schmelze und der Kokillenoberfläche. Die Bildung der Randschicht ist vom Wärmeübergangskoeffizienten bzw. vom Wärmeübergangswiderstand abhängig. Der Zusammenhang wurde von Siavoshani [109] analysiert und ist in Bild 4.16 dargestellt.

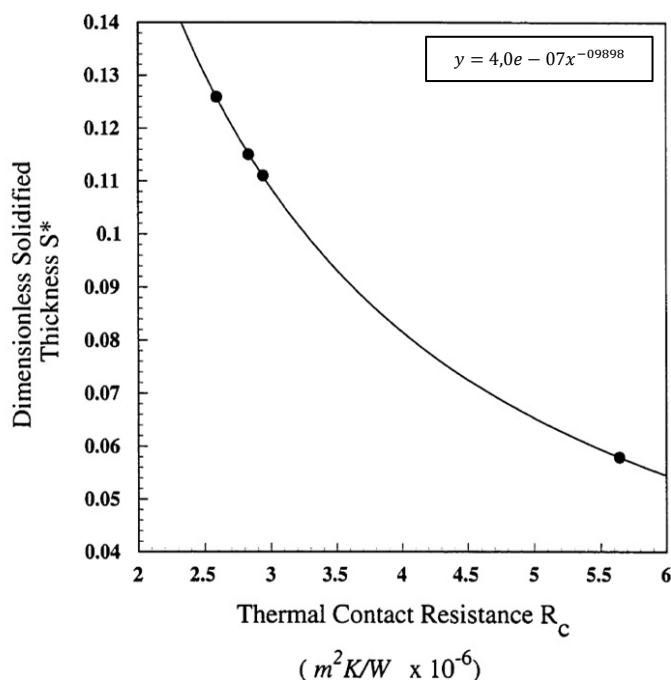


Bild 4.16: Randschichtdicke in Abhängigkeit vom Wärmeübergangswiderstand [109]

Die dimensionslose Randschichtdicke S^* ergibt sich aus dem Verhältnis der Dicke S zum Tropfendurchmesser S/D_0 . Typischerweise liegt der Wärmeübergangskoeffizient beim Druck- und Kokillengießen im Bereich von $1.000 \text{ W/m}^2\text{K}$ bis $10.000 \text{ W/m}^2\text{K}$. Durch extrapolieren der gegebenen Funktion können resultierende Randschichtdicken von ca. $0,0005 \text{ mm}$ bis $0,005 \text{ mm}$ abgeschätzt werden. Diese dünnen Randschichten können durch heiße, nachströmende Schmelze wieder aufgeschmolzen und komplett beseitigt werden. Tabelle 4.2 zeigt zusammengefasst die wichtigsten Einflussgrößen auf die Erstarrung bzw. Erstarrungsdauer bei AlSi-Legierungen.

Tabelle 4.4: Die wichtigsten Einflussgrößen auf die Erstarrung bei AlSi-Legierungen

| Einflussgröße | Einschränkung | Bemerkung | Bewertung Einflussgröße | Quelle |
|---------------------------|---|------------------------------|--------------------------------|---------------|
| Gusslegierung | - | - | hoch | [23; 59; 102] |
| Kokillenwerkstoff | - | - | hoch | [19] |
| Oberflächenbeschaffenheit | $0,1 \mu\text{m} < R_z < 100 \mu\text{m}$ | - | hoch | [94; 110] |
| Oberflächenstruktur | - | - | hoch | [37; 94; 111] |
| Gießmodul | - | dünnwandige Gussteilbereiche | hoch | [68] |

4.3 Funktionale Oberflächen in der Gießereitechnik

4.3.1 Schichten

In der Gießereitechnik sind Schichten Überzugsstoffe für Kokillen und verlorene Formen. Dieser temporäre Überzug schützt die Kokille vor chemischer, thermischer und mechanischer Beanspruchung durch die Schmelze. Als Grundmaterial werden feingemahlene, feuerfeste Keramiken (Titanoxid, Talkum, Glimmer, Eisenoxid, Aluminiumoxid) in Verbindung mit Bindemitteln (Natriumsilikat, Ton, Stärke), Lösungsmitteln (Wasser, Alkohol) und Additiven verwendet. Die Schlichte kann gesprüht, gepinselt oder im Tauchverfahren aufgetragen werden. Geschlichtete Kokillenoberflächen reduzieren die nötige Entformungskraft durch die Verhinderung der Adhäsion zwischen Aluminium und Eisen. Typische Schichtdicken der Schlichtesysteme liegen zwischen $50 \mu\text{m}$ und $150 \mu\text{m}$. Durch die Wärmeisolation der keramischen Bestandteile und der Oberflächenrauheit der Schlichte wird das Fließ- und Formfüllungsvermögen positiv beeinflusst [21; 54; 58; 94; 110; 112–116].

Die Morphologie der Schlichte beeinflusst den Wärmestrom maßgeblich. Die Schlichtebestandteile und deren thermophysikalischen Eigenschaften spielen eine wichtige aber untergeordnete Rolle. Entscheidend sind die Rauheit [21; 53; 94; 110; 112; 114; 116–118] und der Aufbau der Schlichte [21; 54; 58; 114–116; 119]. Unter Aufbau kann das Verhältnis zwischen den festen Bestandteilen und der ein-

geschlossenen Luft in der Schlichte verstanden werden. Griffiths [116] berechnete den Öffnungswinkel der Schichten θ aus der Rauheitshöhe R_z und dem mittleren Abstand der Rauheitsspitzen S_m :

$$\tan \theta = \frac{0,5 \cdot S_m}{R_z} \quad (4.21) \quad [116]$$

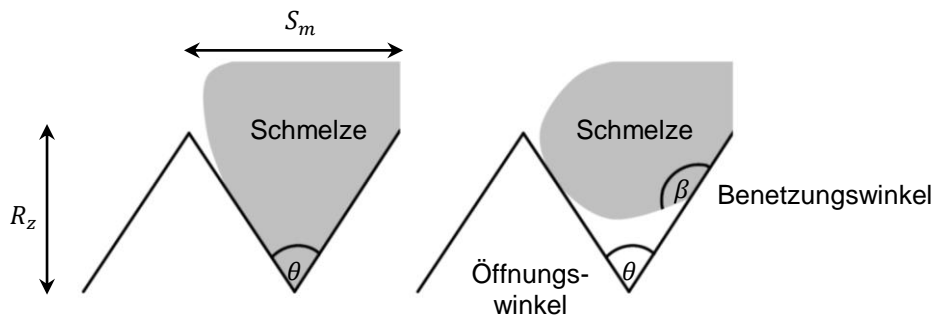


Bild 4.17: Zusammenhang zwischen Benetzungsverhalten und Rauheit [116]

Griffiths sagt, wenn der Öffnungswinkel θ der Rauheit kleiner ist als der Benetzungswinkel zwischen der Schlichte und der Schmelze, kann diese nicht vollständig in die Rauheit der Schlichte eindringen, vgl. Bild 4.17 [116]. Kawai [118] konnte ebenfalls durch seine Untersuchungen bestätigen, dass die Schlichte und deren Rauheit nicht 100 %ig durch die Schmelze abgebildet wird, wodurch ein Luftspalt zwischen den Rauheitsspitzen entsteht. Den Nachweis lieferte er anhand von Rauheitsmessungen der Schlichte und dem erzeugten Gussteil. Schwarm [62] führte mit einer Versuchskokille Ausströmversuche durch, um den Einfluss der Schlichterauheit auf die Ausströmgeschwindigkeit und die Ausströmdauer zu untersuchen. Er kam zu der Erkenntnis, dass eine glatte Schlichte mehr Reibungsverluste durch die größere Kontaktfläche zur Schmelze verursacht. Dem entsprechend stellt sich ein höherer Wärmestrom ein, wodurch die Schmelze schneller abkühlt. Im Gegensatz dazu erzeugt eine rauere Schlichte weniger Reibungsverluste, da sich die Schmelze nur im Kontakt mit den Rauheitsspitzen befindet. Der Wärmestrom ist aufgrund des Luftspaltes deutlich geringer, wodurch die rauere Schlichte wärmeisolierender wirkt [62]. Adefuye [53] stellte ebenfalls die Theorie auf, dass die Reibung zwischen Schmelze und Schlichte aufgrund des Luftspaltes deutlich reduziert werden kann. Gierth [94] griff ebenfalls diesen Ansatz auf, um die Wärmeisolation von verschiedensten Schichten abzuschätzen. Seine Bewertung basiert auf der Annahme, dass die Luftspaltdicke zwischen den Rauheitsspitzen ca. $R_z/2$ beträgt. Um die Theorie der Luftspaltbildung zwischen den Rauheitsspitzen zu bestätigen, führte Griffiths [116] Gießversuche mit Helium-Atmosphäre und Versuche unter Vakuum durch. Das Ergebnis seiner Untersuchungen ist in Bild 4.18 dargestellt. Man erkennt den Einfluss des Luftspaltes auf den Wärmeübergangskoeffizienten.

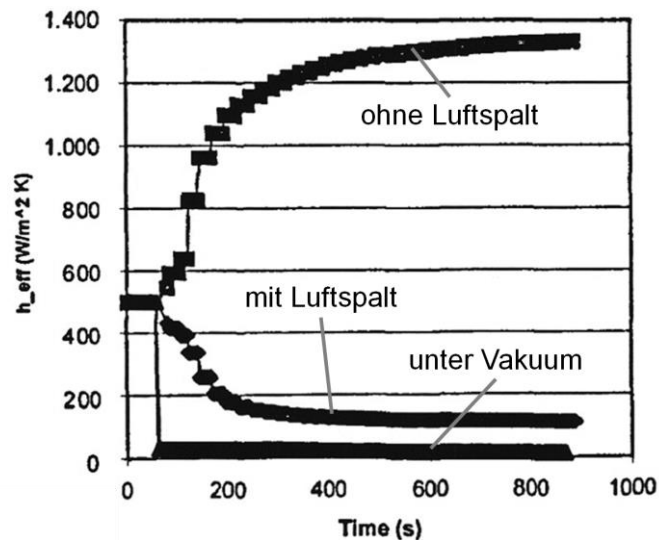


Bild 4.18: Vergleich zwischen Vakuum, Luftspalt und kompletter Füllung der Schlichte [114]

Zu dem Thema „Aufreißen“ bzw. „Verankerung“ der Oxidhaut während des Formfüllvorganges existieren einige Arbeiten [68; 114; 115; 117; 120]. So untersuchte Szalai [68] zum Beispiel den Einfluss von groben korund- und fluorhaltigen Partikeln. Die theoretische Wirkungsweise ist in Bild 4.19 dargestellt.

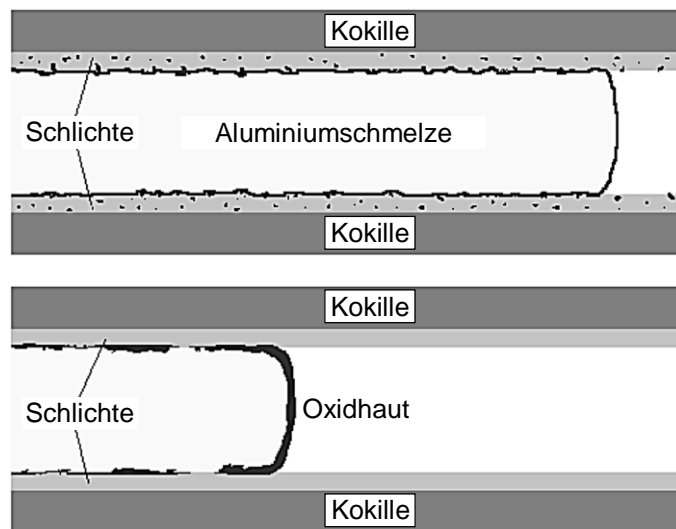


Bild 4.19: Verankerung der Oxidhaut durch eine raue Schlichte auf der Kokillenoberfläche [68; 120]

Korund soll zur mechanischen Bindung und die fluorhaltigen Partikel zur chemischen Bindung der Oxidhäute beitragen, leider blieben die Untersuchungen ohne nennenswerten Erfolg [114]. Szalai [68] fand bei seinen Untersuchungen heraus, dass ohne Vorhandensein einer Oxidhaut die Fließlänge bei Aluminiumlegierungen um bis zu +7 % gesteigert werden kann. Dieses Potenzial könnte somit von einer idealen Schlichte erzielt werden, wenn diese die Oxidhaut optimal „verankert“ bzw. stetig „aufreißt“.

In weiteren Arbeiten wird beschrieben, dass die Schlichte die Formfüllung aufgrund einer verbesserten Formentlüftung unterstützt. Durch den porösen Aufbau der Schlichte kann die Luft besser aus der Kavität entweichen [114; 115; 117; 120].

4.3.2 Oberflächenstrukturen

4.3.2.1 Einsatzgebiete

Strukturierte Oberflächen zählen in der Gießereitechnik seit mehreren Jahrzehnten zum Stand der Technik. Hierunter sind Werkzeuge, komplette Kokillen, Einsätze und Gussteileinleger zu nennen. Die nachfolgenden ältesten, recherchierten Schriften stammen aus der Mitte des 19. Jahrhundert. Zu dieser Zeit wurden im Bereich des Standgießens bereits oberflächenstrukturierte Kokillen eingesetzt. Diese Technologie setzte sich auch nachfolgend bei weiteren Gießverfahren, wie dem Gießen mit verlorenen Formen, dem Druckgießen und dem Kokillengießen durch. Der Einsatz von Oberflächenstrukturen verfolgt stets das Ziel, die Wirtschaftlichkeit und die Prozesssicherheit durch die positive Beeinflussung der gießtechnologischen Eigenschaften der vergossenen Schmelzen zu verbessern.

4.3.2.2 Strang- und Bandgießen

Im Stranggießen werden nachweislich seit 1940 oberflächenstrukturierte Kokillen eingesetzt. Zahlreiche Patente und wissenschaftliche Arbeiten beschreiben verschiedenste Punkt-, Linien-, Waffel- und Kegelstumpfstrukturen [25; 90; 121–128]. Eine entsprechende Waffelstruktur ist in Bild 4.20 dargestellt. Die Oberflächenstrukturen dienen bei der Herstellung von Al- und Fe-Halbzeugen der Reduzierung von Kaltlauf und der stranggusstypischen Ausschwitzungen. Die Erfinder berichten von einer gezielten Verbesserung der Oberflächenqualität der abgegossenen Masseln. Grund hierfür seien die Reduzierung des Wärmestromes durch die verringerte Kontaktfläche zwischen Schmelze und Kokille, dem erzeugten Luftspalt sowie das Ableiten von Gas durch das durchgängige Strukturnetzwerk.

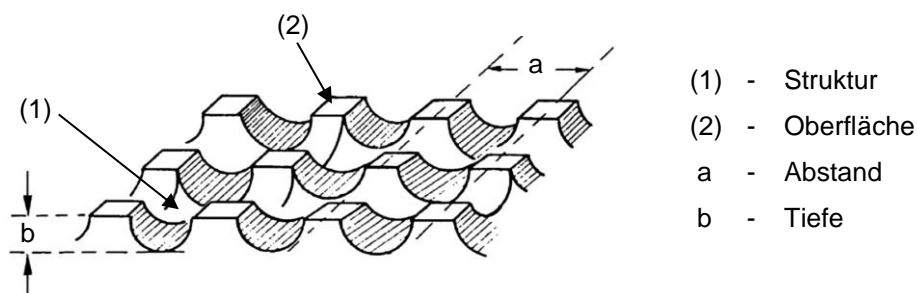


Bild 4.20: Patentierte Oberflächenstruktur für das Stranggießen [121; 122]

Ein anderer Ansatz wurde von Speith [129] verfolgt. Er patentierte eine Stranggießkokille mit umlaufender, sinusförmigen Wellenstrukturierung, die während des Gießprozesses komplett mit Schmelze gefüllt ist. Durch die resultierende Oberflächenvergrößerung soll die Gießleistung der Stranggusskokille gesteigert werden.

Ein weiteres Einsatzgebiet von Oberflächenstrukturen ist das Bandgießen. Die Strukturen befinden sich auf den Gießwalzen und verfolgen das Ziel, die Schmelze gleichmäßig aus dem Tümpel zu ziehen, um ein kontinuierliches Band mit konstanter Dicke zu erzeugen [130–132].

4.3.2.3 Gießen mit verlorenen Formen

Beim Gießen mit verlorenen Formen werden sogenannte Kühlleisen aus Metall eingesetzt, um der Schmelze, im Vergleich zum Formstoff, lokal mehr Wärme zu entziehen, vgl. Bild 4.21. Für die Kühlleisen wurden eine Vielzahl von Oberflächenstrukturen patentiert. Der Nachweis, dass die strukturierte Oberfläche, im Vergleich zu einer glatten Oberfläche, einen höheren Wärmestrom induziert, wurde nicht geführt [133].

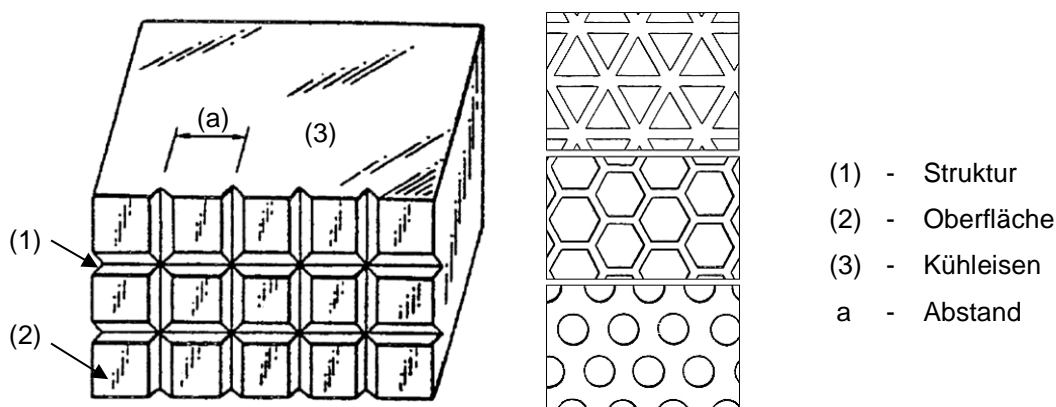


Bild 4.21: Patentierte Kühlleisenstrukturen für das Gießen mit verlorenen Formen [133]

Für das Gießen mit verlorenen Formen zur Herstellung von Gehäusen und Rädern gibt es ein weiteres Patent über den Einsatz von Oberflächenstrukturen. Ziel ist die Reduzierung der Bauteilmasse durch die Verringerung der Gussteilwandstärke ($< 5,0$ mm). Die Erfinder berichten über Masseeinsparungen von bis zu 30 % im Vergleich zu Gussteilen mit konventioneller, glatter Oberfläche. Bild 4.22 verdeutlicht das patentierte Prinzip. Hierbei strömt die Schmelze durch die Oberflächenstruktur und füllt anschließend durch eine entsprechende Querströmung die angrenzenden Flächen. In den dickwandigen Kanälen kühlt die Schmelze langsamer ab, wodurch Kaltlauf vermieden werden kann.

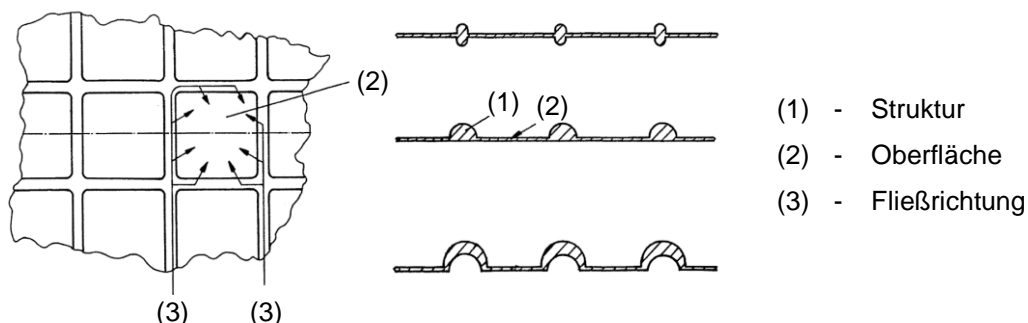


Bild 4.22: Patentierte Oberflächenstruktur für das Gießen mit verlorenen Formen [134]

Einen weiteren Ansatz verfolgte Hiratsuka [135] in seinen Untersuchungen zur Steigerung der Fließlänge von Gusseisen. Hiratsuka untersuchte mit einer verlorenen Form aus CO_2 gebundenen Sand die Wirkung von Querrillen. Er stellte fest, dass durch eine gezielte Positionierung mit definiertem Abstand zum Anguss die Fließlänge um bis zu 50 % gesteigert werden kann, vgl. Bild 4.23.

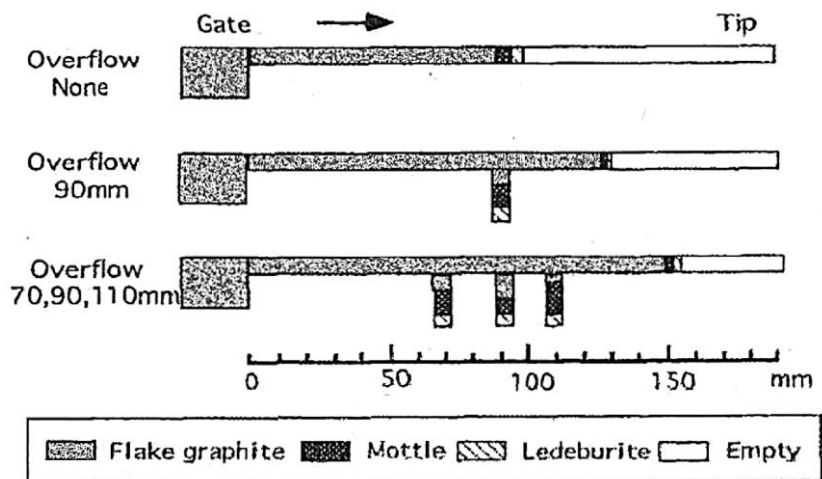


Bild 4.23: Der Einfluss von Querrillen auf die Fließlänge von Gusseisen [135]

Die Besonderheit der untersuchten Strukturen sind die geometrischen Abmessungen. Die Breite der Querrille entspricht der Höhe und die Tiefe dem dreifachen des Gießkanals (3,0 mm). Hiratsuka begründete die Steigerung der Fließlänge mit der gezielten Abführung der „kalten“ Schmelze an der Strömungsfront in die Querrillenstrukturen, wodurch heißere Schmelze nachströmen kann.

4.3.2.4 Druckgießen

Im Druckgießen ist der Einsatz von Oberflächenstrukturen weit verbreitet. Bild 4.24 zeigt ein komplexes, dünnwandiges Gussteil aus einer Magnesiumlegierung. Fast die komplette Gussteiloberfläche weist Oberflächenstrukturen auf. Anwendung fanden einfache Linienstrukturen in Entformungsrichtung sowie Waffelmusterstrukturen.

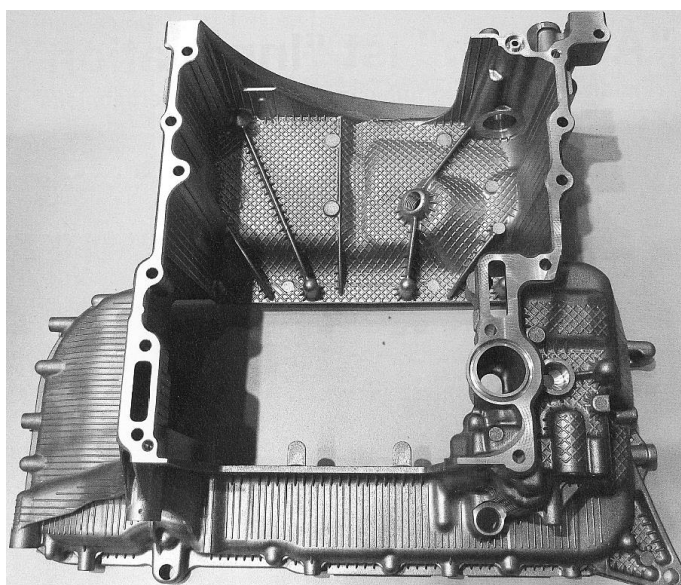


Bild 4.24: Gussteil aus einer Magnesiumlegierung mit zahlreichen Oberflächenstrukturen [136]

Ein weiterer Ansatz im Druckgießen wurde von King und Klein [137; 138] aufgegriffen. Sie versuchten durch eine strukturierte Werkzeugoberfläche eine Strömungsoptimierung der Schmelze zu erreichen. Ziel war die Verzögerung der Strömungsablösung zwischen der Schmelze und der Werkzeugoberfläche während der Füllphase im Anschnittbereich. Es wurden an die Strömungsgeschwindigkeit angepasste Ribletstrukturen (Lasertiefe 1 μm bis 2 μm) in die Werkzeugoberfläche eingebracht. Die Fließlängensteigerung betrug ca. 4 %, jedoch nur ohne die Verwendung von druckgusstypischen Trennmitteln. Laut den Spekulationen der Autoren könnte die Rauheit der Oberfläche die Verbesserung der Fließlänge hervorgerufen haben. Durch die geringere Benetzung reduzierte sich der Wärmeübergang zwischen der Schmelze und dem Werkzeug. Ähnliche Erfahrungen machte bereits Birch [139] 1991 im Zinkdruckguss. Eine Aufrauung der Oberfläche steigerte die Formfülldauer um 50 %, wodurch druckgusstypische Fließfiguren und Kaltläufe reduziert werden konnten. Die Druckgießer King und Klein schlossen eine Strömungsoptimierung durch die Ribletstrukturen aus, da die Strukturen nur zu ca. 70 % gefüllt wurden. Die Autoren empfehlen eine Übertragung auf das Kokillengießen, da hier deutlich geringere Strömungsgeschwindigkeiten der Schmelzen auftreten und somit größere Oberflächenstrukturen denkbar wären [137; 138].

4.3.2.5 Kokillengießen

Beim Kokillengießen werden Oberflächenstrukturen häufig bei Gussteilwandstärken kleiner 6,0 mm und in kaltlaufgefährdeten Bereichen eingesetzt. Bild 4.25 links zeigt eine strukturierte Kokillenoberfläche. Die Einbringung der Strukturen erfolgt meist spanend durch Kugelkopffräser oder Frässpatel. Die Tiefe beträgt typischerweise 0,5 mm, die Breite 1,0 mm und der Linienabstand 5,0 mm, vgl. Bild 4.25 rechts. Seltener finden sich Strukturen mit Tiefen von 1,0 mm, Breiten von 2,0 mm und Linienabständen von 3,0 mm.

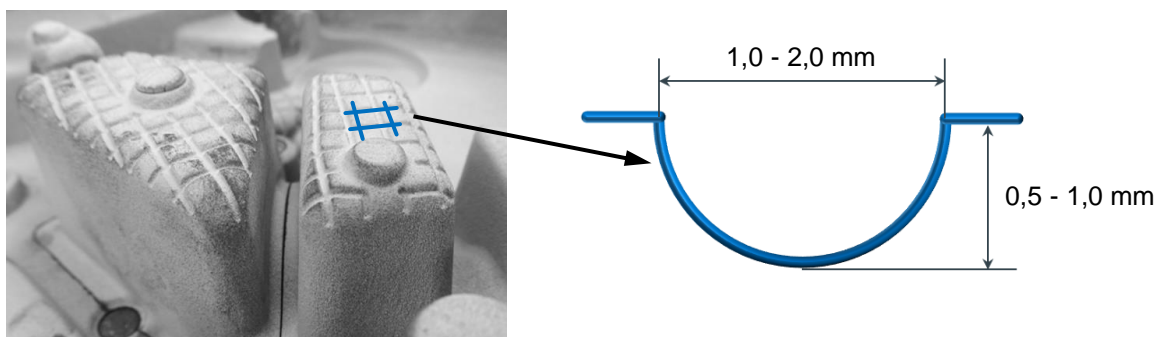


Bild 4.25: Kokille mit Oberflächenstruktur (links) und schematischer Strukturdarstellung (rechts) [140]

Szalai [68] untersuchte den Einfluss von Oberflächenstrukturen zur Reduzierung von Kaltlauf im Bereich des Kolbenfensters für Verbrennungsmotoren. Untersuchungsgegenstand waren Waffel- und Linienstrukturen mit Linienabständen von 2,0 mm und 3,0 mm und Tiefen von 0,3 mm und 0,5 mm. Szalai kam zu der Erkenntnis, dass sich die Oberflächenstrukturen positiv auf das Gussergebnis auswirken. Die Verbesserungen der Fließ- und Formfülllänge sollen auf der Wärmeisolation, der verbes-

serten Formentlüftung durch die Struktur sowie auf dem „Aufreißen“ und „Verankern“ der Oxidhaut durch die scharfkantige Oberfläche, beruhen [90]. Für die von Szalai [68] beschriebene „Ankerwirkung“ müssen die Oberflächenstrukturen mit Schmelze gefüllt werden. Diese Aussage steht im Widerspruch mit den Empfehlungen von Campbell. Campbell [81] empfiehlt die gezielte Einbringung von Strukturen in die Kokillenoberfläche, um die Erstarrung einzelner Gussteilbereiche durch die Vergrößerung der Oberfläche positiv zu beeinflussen.

Im Gegensatz dazu konnten Assar [141] im Zink- sowie Coates [142] im Aluminium-Kokillengießen eine Reduzierung des Wärmeüberganges durch eine Aufrauung der Kokillenoberfläche im Labormaßstab nachweisen. Dem gegenüber steht die widersprüchliche Aussage von Griffiths. Seine gemessenen Gussteilrauheiten lagen fortwährend deutlich über den eingestellten Rauheiten der Kokillenoberfläche. Somit bestimmt laut Griffiths die Gussteilrauheit maßgeblich den Wärmeübergang und nicht die Kokillenrauheit [143; 144].

Marx [32] untersuchte im Niederdruck-Kokillengießen unter anderem den Einfluss von Oberflächenstrukturen auf die Fließ- und Formfülllänge im Vergleich zu einer glatten Oberfläche. In die vertikal geteilte Versuchskokille wurden ein gefrästes und ein gelasertes Waffelmuster eingebracht. Das gelaserte Waffelmuster ist in Bild 4.26 links dargestellt. Marx konnte in Abhängigkeit von der Oberflächenstruktur eine Fließlängensteigerung von +20 % bis +50 % nachweisen. Eine Erklärung für die Wirkmechanismen konnte aus dieser Arbeit nicht entnommen werden.

Für das Schwerkraft-Kokillengießen wurden laserstrukturierte Oberflächen erstmals von Gierrh, Knorr und Beganovic analysiert [37; 94; 111; 140; 145]. Untersucht wurden unter anderem die aus dem Druckgießen empfohlenen Ribletstrukturen mit entsprechender Größenanpassung (Tiefe 0,75 mm bis 1,0 mm) und eine nach bionischem Vorbild entwickelte Haifisch-Struktur, vgl. Bild 4.26 rechts. Zur Strukturauslegung wurden entsprechende Vereinfachungen getroffen. Eine Annahme war, dass sich die vergossene AlSi11Mg-Legierung wie ein newton'sches Fluid verhält. Dies ist jedoch nach derzeitigem Kenntnisstand kritisch zu hinterfragen, vgl. Kapitel 4.2.1.2 (Viskosität). Dennoch zeigten die Oberflächenstrukturen ein deutliches Potenzial zur Fließlängensteigerung bei der horizontal geteilten Versuchskokille von bis zu +150 %. Ein erster Versuch zur theoretischen Beschreibung der strömungsoptimierenden Wirkung der Haifisch-Struktur auf die Schmelze erfolgte von Gierrh [94].

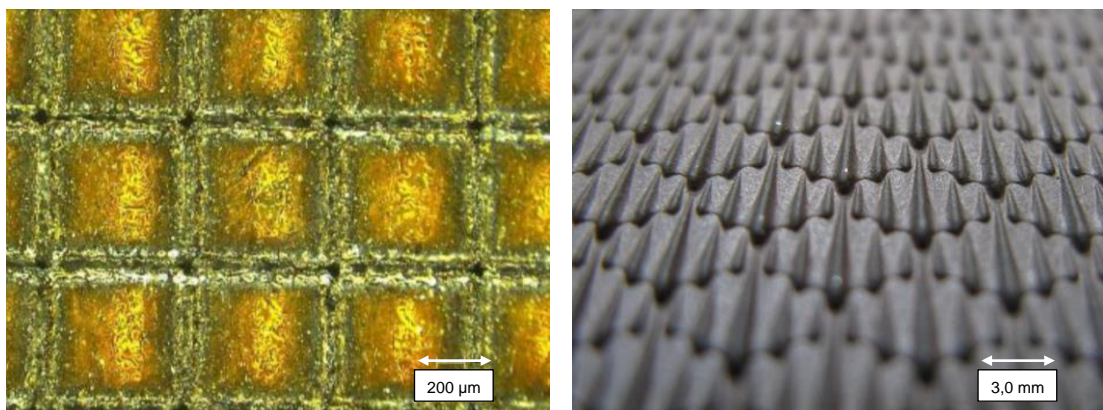


Bild 4.26: Laserstrukturierte Oberflächen für das Niederdruck- und das Schwerkraft-Kokillengießen

Die Theorie der Luftspaltbildung zwischen der Schmelze und der oberflächenstrukturierten Kokille, wurde von Knorr [37; 140] und Gierth [94] weiter untersucht. Durch numerische Untersuchungen stellte Knorr fest, dass es aufgrund der Oberflächenspannung der vergossenen Schmelze möglich war, die eingebrachten Oberflächenstrukturen zu überströmen. Laut den numerischen Untersuchungen ergaben sich bei den Waffelmusterstrukturen Fließlängensteigerungen von ca. 50 %.

Das Benetzungsverhalten von Kokillenoberflächen durch Schmelzen wurde detailliert von Gierth [94] untersucht. Er kam zu der Erkenntnis, je rauer die Kokillenoberfläche ist, desto größer ist der resultierende Benetzungswinkel. In Abhängigkeit von der Oberflächentopographie ergaben sich Benetzungswinkel von bis zu 180 ° zwischen der Schmelze und der Kokille. Es ist laut Gierth davon auszugehen, dass sich bei Benetzungswinkeln $> 130^\circ$ Luftspalte mit wärmeisolierenden Eigenschaften zwischen der Schmelze und der Kokillenoberfläche ausbilden. Diese Theorie deckt sich mit zahlreichen wissenschaftlichen Untersuchungen [144; 146–149]. Griffiths [149] stellte fest, dass beim Kokillengießen mit einer rauen Oberfläche der Wärmeübergang durch eine Druckerhöhung verbessert werden kann.

4.3.2.6 Auswirkung auf das Gussteil

Oberflächenstrukturen ermöglichen eine positive Beeinflussung der gießtechnologischen Eigenschaften, jedoch können auch negative Effekte resultieren, wie Fuchs [150] zeigte. Er verweist auf die erhöhte Kerbempfindlichkeit von dünnwandigen Gussteilen mit erhabenen Oberflächenstrukturen. Konstruktionsrichtlinien von Beganovic und Gierth für die Auslegung von strukturierten Werkzeugoberflächen zur Reduzierung der Kerbempfindlichkeit finden sich in einigen wissenschaftlichen Arbeiten und Veröffentlichungen [15; 16; 151].

Positive Effekte erhoffte sich Ivanov durch die Übertragung von Oberflächenstrukturen auf das zugießende Gussteil [152–154]. Ziel war die Herstellung von erhabenen Riblet-Strukturen im Inneren eines Ansaugkrümmers zur Reduzierung der Strömungsverluste und die Steigerung der Leistung des Verbrennungsmotors. Ivanov übertrug die feinen Strukturen von seinem Urmodell auf ein WachsmodeLL, welches anschließend im Feingießverfahren abgegossen wurde. Die Übertragung der Strukturen im μm -Bereich auf das Gussteil gelang gut, jedoch blieb eine nachweisliche Leistungssteigerung des Verbrennungsmotors durch eine Strömungsoptimierung der Ansaugluft aus.

Beim Eingießen von strukturierten Eisenguss-Laufbuchsen im Zylinderkurbelgehäuse aus Aluminiumlegierungen soll die Schmelze in die Buchsenstrukturierung eindringen und eine mechanische Verklammerung sowie einen verbesserten Wärmestrom zwischen der Zylinderlaufbuchse und dem Zylinderkurbelgehäuse realisieren [155–158].

4.3.3 Zusammenfassung

Die Recherche zum Thema Oberflächenstrukturen bei Gießwerkzeugen zeigt, dass diese schon seit mehreren Jahrzehnten in vielen Bereichen, mit teilweise unterschiedlichen Aufgaben, eingesetzt werden. Tabelle 4.5 fasst die theoretischen Wirkmechanismen der Oberflächenstrukturen zusammen.

Die wahrscheinlichste Theorie besagt, dass die Oberflächenstrukturen eine Wärmeisolation auf die Schmelze ausüben, gefolgt davon, dass die Aluminiumoxidhaut durch die scharfkantige Oberflächenstruktur „aufgerissen“ wird. Vereinzelt wird von einer Laminarisierung der turbulenten Schmelzeströmung im Randbereich berichtet. Seltener finden sich Theorien zur Unterstützung der Kokillenenlüftung und der positiven Beeinflussung der Erstarrungsdauer der Schmelze durch eine Oberflächenstruktur.

Tabelle 4.5: Theoretische Wirkmechanismen der Oberflächenstrukturen

| Aufgestellte Theorie | Nachweis der Theorie |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> ▪ Wärmeisolation durch Luftspalt [37; 68; 139; 159] | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Wärmeisolation durch Luftspalt [37; 68; 159] |
| <ul style="list-style-type: none"> ▪ Beeinflussung der Erstarrungsdauer [81; 133] | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Beeinflussung der Erstarrungsdauer [98; 111; 152] |
| <ul style="list-style-type: none"> ▪ Aufreißen der Oxidhaut [40; 68; 114] | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Aufreißen der Oxidhaut [nicht bekannt] |
| <ul style="list-style-type: none"> ▪ Strömungsverbesserung [111; 138; 152] | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Strömungsverbesserung [nicht bekannt] |
| <ul style="list-style-type: none"> ▪ Kavitätentlüftung [68; 114] | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Kavitätentlüftung [nicht bekannt] |

Nachfolgend werden die plausibelsten Theorien zu den Oberflächenstrukturen numerisch und experimentell untersucht und auf deren Wahrheitsgehalt überprüft. Ziel ist eine detaillierte Aussage über das Potenzial zur Fließ- und Formfülllängensteigerung sowie die positive Beeinflussung der Erstarrungsdauer. Hauptaugenmerk sind die Wirkmechanismen Wärmeisolation, Wärmeabfuhr und das Aufreißen der Oxidhaut.

5 Voruntersuchung – Potenzialanalyse

5.1 Simulation

5.1.1 Modellbeschreibung

Als kommerzielles Simulationstool wurde Flow 3D verwendet. Die Berechnungen erfolgten auf einer HP Z820 Workstation mit 32 Prozessoren á 3,3 GHz und 256 GB Arbeitsspeicher.

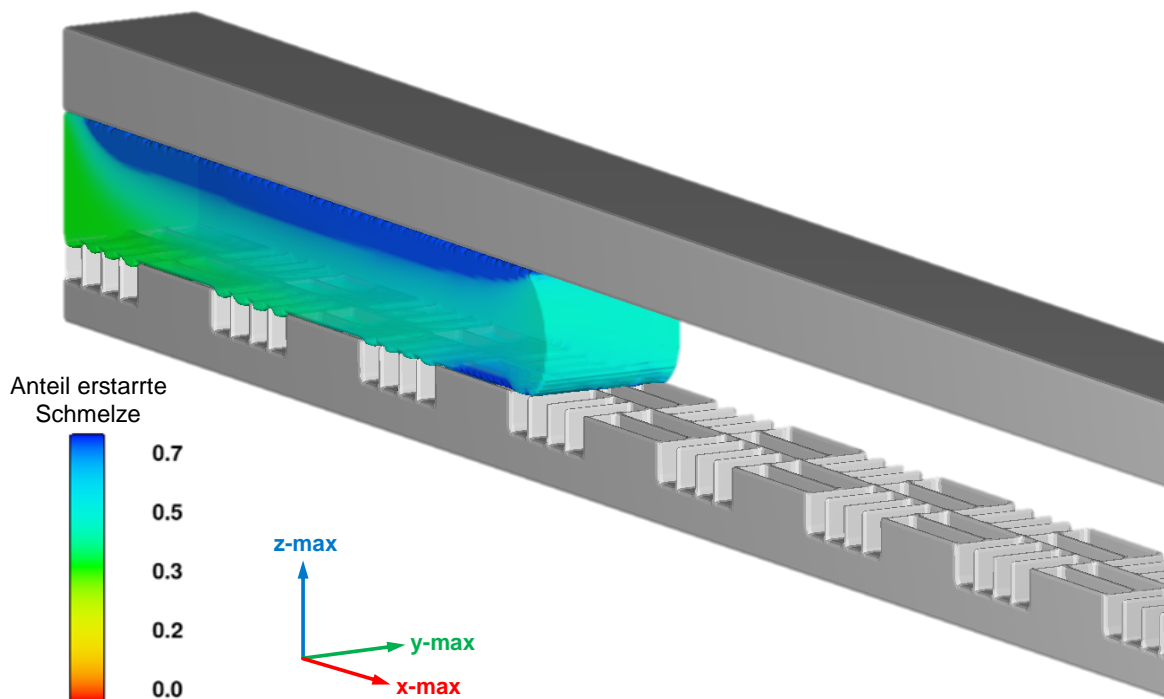


Bild 5.1: Das Berechnungsmodell *Fließlänge* zur Ermittlung der Fließlänge

Bild 5.1 zeigt das Berechnungsmodell, mit dem das Potenzial zur Steigerung der Fließlänge untersucht wurde (in Anlehnung an [37; 140]). Strukturiert wurde jeweils nur der untere Bereich des Modells. Die Abmessung des Berechnungsmodells betrug 200 mm x 15 mm (L x H). Die Breite wurde so angepasst, dass jede untersuchte Struktur mindestens einmal komplett abgebildet wurde. Der Gießkanal hatte eine Höhe von 6 mm.

Numerisch wurde nur ein Fluid (Schmelze) berücksichtigt. Das zweite Fluid (Luft) wurde vereinfacht beschrieben. Der Wärmeübergangskoeffizient zwischen der Schmelze und dem „leeren Raum“ wurde mit 20 W/mK definiert. Die Interaktion zwischen beiden Fluiden wurde durch das physikalische Berechnungsmodell „Bubble Modell“ beschrieben. Hierdurch war es möglich Lufteinschlüsse und Blasenbildung während der Formfüllung in der Kavität zu berechnen.


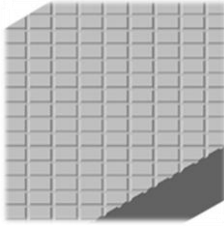
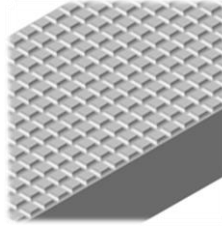
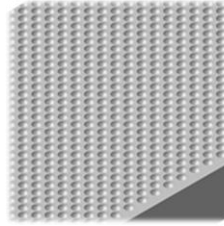
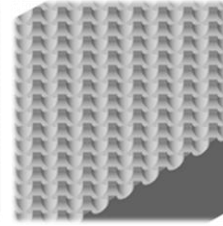


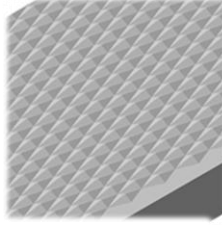
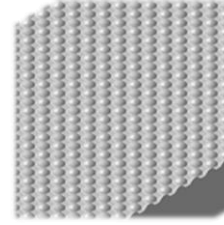
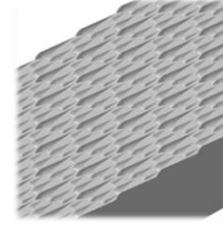
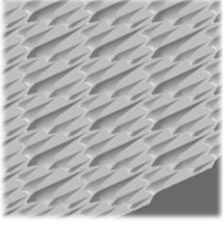

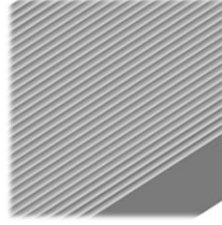
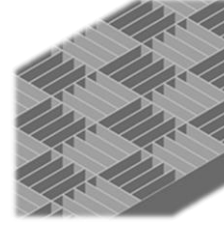
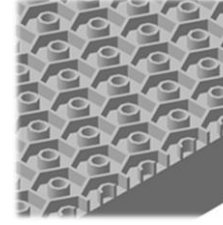
Die Initial-Kokillentemperatur sowie die Ebenen **z-min** und **z-max** wurden als Wandbedingungen mit einer Temperatur von 350 °C definiert. Die Gießtemperatur der AlSi11Mg-Legierung betrug 575 °C. Aus dieser geringen Gießtemperatur resultierte bereits ein 25 %iger, legierungsabhängiger Feststoffanteil in der Schmelze.

Über die Ebene **x-min** strömte die AlSi11Mg-Schmelze mit einer Geschwindigkeit von 0,075 m/s ein. **X-max** wurde als Auslauf-Randbedingung definiert. Die zwei Symmetrierandbedingungen **y-min** und **y-max** begrenzten das Berechnungsgebiet. Für die Vernetzung des Berechnungsmodells wurden Elemente mit einer Kantenlänge von 0,2 mm verwendet. Es zeigte sich, dass die Strukturhebungen bzw. -vertiefungen durch mindestens vier oder mehr Elemente pro Orientierungsrichtung beschrieben werden mussten, um eine ausreichende Strukturwiedergabe für die Strömungsberechnung zu erreichen. Die Kantenlänge der Vernetzungselemente wurde auf die feinste Oberflächenstruktur (hier *Haisfisch fein*) abgestimmt und war für alle Vergleichsberechnungen identisch. Hierdurch konnten entsprechende Vernetzungseinflüsse auf das Simulationsergebnis ausgeschlossen werden [140; 160]. Aus der Kantenlänge und der Größe des Berechnungsmodells *Fließlänge* ergaben sich Elementanzahlen von 300.000 bis 1.900.000. Zur Reduzierung der Berechnungskomplexität wurden einige thermophysikalische Eigenschaften als konstant angenommen. Etwaige Oberflächenrauheiten der Strukturen wurden durch eine Reduzierung der Kontaktfläche vereinfacht beschrieben. Tabelle 10.2 im Anhang D zeigt zusammengefasst die Randbedingungen und Annahmen für das Berechnungsmodell *Fließlänge*.

5.1.2 Durchführung

Mit den definierten thermophysikalischen Randbedingungen und Simulationsparametern wurden 26 Oberflächen bzw. Oberflächenstrukturen untersucht und analysiert. Dies waren aus dem Stand der Technik bekannte und neu entwickelte Oberflächenstrukturen. Tabelle 5.1 stellt diese gegenüber.

Tabelle 5.1: Numerisch untersuchte Oberflächen bzw. Oberflächenstrukturen als CAD-Daten

| | | | | |
|---|---|---|--|---|
|  |  |  |  |  |
| <i>glatt</i> | <i>Waffel 0° Waffel 45°</i> | <i>Waffel fein</i> | <i>Golfball 1,0 mm Golfball 2,0 mm Golfball 3,0 mm</i> | <i>ccc 1.0 ccc 2.0</i> |
|  |  |  |  |  |
| <i>Q-Rille 1,0 mm Q-Rille 2,0 mm Q-Rille 4,0 mm</i> | <i>L-Rille (L) 1,5 mm L-Rille (L) 2,0 mm</i> | <i>Raute (L)</i> | <i>Noppe (L)</i> | <i>Haifisch klein</i> |
|  |  |  |  |  |
| <i>Haifisch grob Haifisch grob 90°</i> | <i>Laser diffus</i> | <i>L-Rille 0,5 mm L-Rille 1,0 mm L-Rille 1,5 mm L-Rille 2,0 mm</i> | <i>Carbon</i> | <i>Eagle Eye</i> |

Die Strukturen *Waffel 0°*, *Waffel 45°* und *Waffel fein* sind die bekanntesten und weit verbreitetsten Oberflächenstrukturen, vgl. Kapitel 4.3.2. Die Strukturdurchmesser liegen bei 1,0 mm und die Linienabstände zwischen 2,5 mm und 5,0 mm. Die Strukturen *ccc 1.0* und *ccc 2.0* sind davon abgeleitete, feinere Strukturen, mit einem deutlich verkleinerten Linienabstand von 1,5 mm und einer Tiefe von 0,5 mm bzw. 1,0 mm. *ccc* steht hierbei für die Abkürzung circular cross cut (kreisförmiger Schnitt).

Die Golfballstrukturen weisen halbkreisförmige Vertiefungen auf. Der Kugeldurchmesser beträgt 1,0 mm, 2,0 mm oder 3,0 mm. Die Tiefe der Strukturen beträgt $D/2$. Die Vertiefungen sind versetzt angeordnet, um eine möglichst hohe Strukturdichte zu erzielen.

Halbkreisförmige Vertiefungen quer oder längs zur Fließrichtung zeichnen die Q-Rillenstrukturen und L-Rillenstrukturen aus. Die Strukturdurchmesser liegen zwischen 0,5 mm und 4,0 mm und die Tiefen zwischen 0,25 mm und 2,0 mm. Bei den L-Rillenstrukturen ist der Linienabstand minimiert, sodass die Strukturspitzen eine Breite von nur 0,2 mm aufweisen.

Die Struktur *Raute (L)* ist durch eine flache, gestreckte, vierseitige Pyramidengeometrie mit der Höhe von 0,5 mm gekennzeichnet.

Die Strukturen *Noppe (L)* und *Haifisch* wurden nach bionischen Vorbildern entwickelt. Als Vorlage dienten das Lotosblatt und die Schuppenstruktur von Haifischen. Die Noppenstruktur hat einen Durchmesser von 1,0 mm bei einer Höhe von 0,5 mm. Die Struktur *Haifisch klein* ist im Vergleich zur Struktur *Haifisch grob* in der Breite und in der Länge um -25 % verkleinert. Die maximale Höhe ist jedoch mit 0,8 mm identisch.

Eine Mischung aus verschachtelten Längs- und Querrillen mit einer Breite von 1,5 mm und einer Tiefe von 2,0 mm stellt die Struktur *Carbon* dar. Die Struktur *Eagle Eye* ist vergleichbar mit einer Golfballstruktur. Zusätzlich zu den halbkreisförmigen Vertiefungen existieren hexagonale Vertiefungen von 2,0 mm. Bild 5.2 zeigt den Formfüllvorgang stellvertretend für die drei Oberflächen *glatt*, *Waffel 45°* und *Q-Rille 2,0 mm*. Der zeitliche Abstand der Momentaufnahmen beträgt 0,1 s. Farblich dargestellt ist der erstarrte Feststoffanteil der Schmelze im Bereich von 0,0 bis 0,7.

Wie den Momentaufnahmen zu entnehmen ist, strömte die Schmelze von links (hellgrün) zwischen die beiden Kokillenhälften (grau) und bildete beim Kontakt mit dieser sofort eine dünne erstarrte Randschicht (blau). Die Ausbildung dieser Randschicht war bezüglich der Bildungsgeschwindigkeit stark von den untersuchten Oberflächenstrukturen abhängig. Es zeigte sich, umso geringer die Kontaktfläche zwischen der Schmelze und der Kokillenoberfläche war, umso später setzte die Bildung einer erstarrten Randschicht ein. Bei den in Bild 5.2 dargestellten Formfüllvorgängen strömte die Schmelze über die Vertiefungen der Strukturen *Waffel 45°* und *Q-Rille 2,0 mm*. Der Effekt des Überströmens konnte ebenfalls bei weiteren untersuchten Oberflächenstrukturen beobachtet werden.

Ausgehend von den Kokillenwänden wuchsen die Erstarrungsfronten von oben und unten aufeinander zu und verengten fortschreitend den verbleibenden Gießkanal für die Schmelze. Durch das stetige Nachströmen der heißen Schmelze konnte die bereits erstarrte Randschicht im Einströmbereich links teilweise wieder aufgeschmolzen und verringert werden. Durch das Zusammenwachsen der oberen und unteren Erstarrungsfront (solid fraction $\approx 0,7$) kam es zum Erliegen des Fließvorganges. Für die glatte Oberfläche erfolgte dies nach ca. 0,5 s, bei den zwei dargestellten, strukturierten Oberflächen nach ca. 0,6 s bzw. 0,7 s. Durch das Abfrieren der Schmelze resultierte ein prozessbedingter Druckanstieg und die Oberflächenstrukturen wurden teilweise gefüllt. Weitere simulierte Formfüllvorgänge können Anhang E entnommen werden.

5.1.3 Auswertung

Bild 5.3 stellt zusammengefasst die ermittelten, normierten Fließlängen [%] in Abhängigkeit von der jeweiligen untersuchten Oberfläche bzw. Oberflächenstruktur dar.

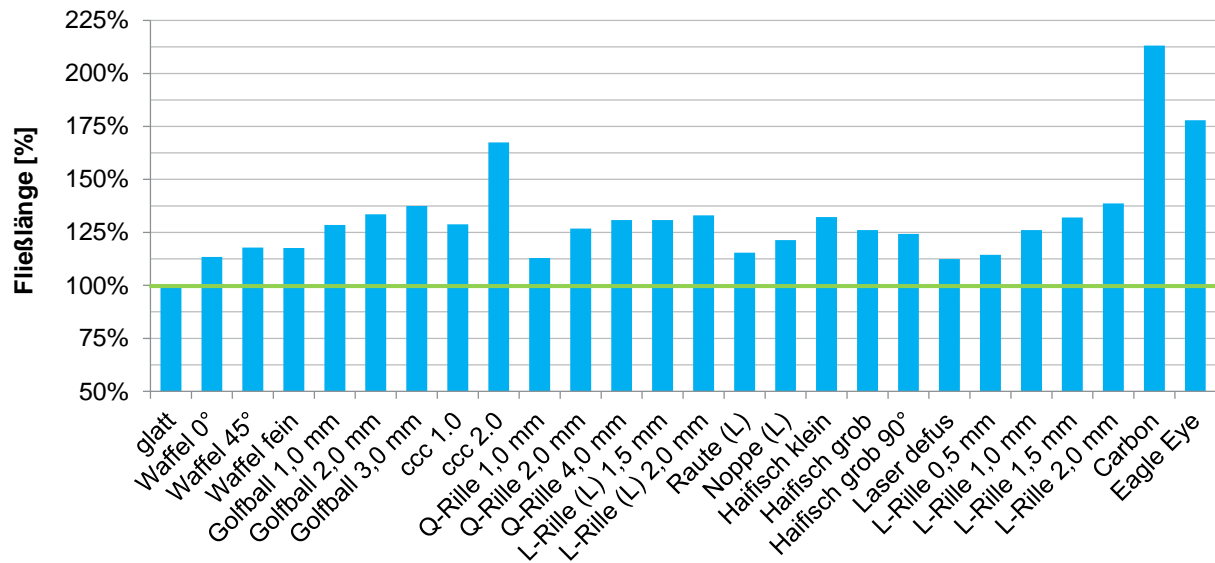


Bild 5.3: Gegenüberstellung der simulierten, strukturabhängigen Fließlängen

Das Simulationsergebnis mit der glatten Oberfläche diente als Referenz. Die im Berechnungsmodell erzielte Fließlänge von 40,3 mm entspricht 100 %. Untersucht wurden insgesamt 26 Oberflächen bzw. Oberflächenstrukturen. Die aus dem Stand der Technik bekannte Struktur *Waffel 45°* erzielte eine Verbesserung der Fließlänge von +18 %. Die deutlichste Steigerung der Fließlänge wurde durch die Strukturen *Golfball 3,0 mm* (+37 %), *ccc 2.0* (+67 %), *Haifisch klein* (+32 %), *Eagle Eye* (+78 %) und *Carbon* (+113 %) erreicht.

Allgemein ließ sich erkennen, dass bei keiner der untersuchten Oberflächenstrukturen eine Verringerung der Fließlänge, im Vergleich zu einer glatten Oberfläche, zu verzeichnen war. Durch eine Vergrößerung der Strukturen (Skalierungsfaktor) konnte die Fließlänge stets gesteigert werden. Dies traf auf die folgenden Strukturen, mit Ausnahme der Struktur *Haifisch*, zu:

- *ccc 1.0* → *ccc 2.0* = +38 % (Skalierungsfaktor 2,00)
- *Golfball 1,0 mm* → *Golfball 3,0 mm* = +8 % (Skalierungsfaktor 3,00)
- *Q Rille 1,0 mm* → *Q-Rille 4,0 mm* = +18 % (Skalierungsfaktor 4,00)
- *Haifisch klein* → *Haifisch grob* = - 6 % (Skalierungsfaktor 1,25)
- *L-Rille 0,5 mm* → *L-Rille 2,0 mm* = +25 % (Skalierungsfaktor 4,00)

Anhand der Simulationsergebnisse wurde deutlich, dass das Füllen der Oberflächenstrukturen von deren geometrischen Abmessungen, dem prozessbedingten Druck und der erstarrten Randschicht abhängig war.

Ausnahme bildeten die Golfballstrukturen. Diese wurden überhaupt nicht gefüllt. Die Strukturen *Eagle Eye* und *Carbon* wurden nur zum Teil gefüllt. Dies kann mit der eingeschlossenen, vereinfacht beschriebenen „Luft“, die am Ende der Formfüllung nicht entweichen konnte, begründet werden. Die verbleibenden Strukturen wie zum Beispiel *Waffel 45°*, *ccc 1.0*, *ccc 2.0*, *Noppe (L)*, *Haifisch* sowie die *Q-Rillen* und die *L-Rillen* weisen ein durchgängiges Strukturnetzwerk auf. Am Ende des Fließvorganges wird die „Luft“ verdrängt und die Strukturen mit Schmelze gefüllt. Weitere Momentaufnahmen von simulierten Formfüllvorgängen mit den Strukturen *Golfball 3,0 mm*, *ccc 2.0*, *Noppe (L)*, *Haifisch grob*, *Eagle Eye* und *Carbon* sind im Anhang E zu finden.

5.2 Experiment

5.2.1 Versuchsaufbau

5.2.1.1 Gießplatz

Bild 5.4 zeigt den Gießplatz, welcher für alle durchgeführten experimentellen Untersuchungen verwendet wurde. Im Vordergrund erkennt man den mobilen Gießtisch. Dieser Gießtisch besitzt zur Aufheizung zwei Heizplatten mit jeweils 3.600 W. Über die Regeltechnik können Temperaturen im Bereich von 20 °C bis 400 °C stufenlos eingestellt werden.



Bild 5.4: Gießplatz mit der modularen Kokille und Messtechnik

Im Hintergrund sieht man zwei elektrisch beheizte Öfen von der Fa. Nabertherm, links ein Umluftofen für Wärmebehandlungen und rechts ein Kammerofen, welcher zur Aufbereitung der zu gießenden Schmelze verwendet wurde. Dieser bot Platz, um bis zu acht SiC-Tiegel mit einem Fassungsvermögen von jeweils 2 Liter Schmelze aufzunehmen. Die Kammerofensteuerung ermöglichte die stufenlose Temperaturregelung zwischen 20 °C und 1.200 °C. Die Aufschmelzung der primären AlSi11Mg-Legierung in Masselform sowie das Erreichen der Gießtemperatur von 780 °C dauerte ca. zwei Stunden.

5.2.1.2 Modulare Kokille

Folgende Aspekte waren bei der Entwicklung, Konstruktion und Anfertigung der modularen Kokille entscheidend:

- Symmetrische und turbulenzarme Formfüllung
- Direkte Vergleichsmöglichkeit zwischen der linken und rechten Kavität
- Herstellung langer (max. 350 mm) und dünner (6,0 mm) Gussteilplatten
- Keine vollständige Formfüllung bei Strömungsgeschwindigkeit < 0,5 m/s
- Einfacher Aufbau und hohe Modularität der Kokille

Zur gießtechnologischen Auslegung der modularen Kokille wurde die kommerzielle Software Flow 3D verwendet. Die verwendeten Simulationsparameter, die thermophysikalischen Größen und der simulierte Formfüllvorgang können dem Anhang G entnommen werden.

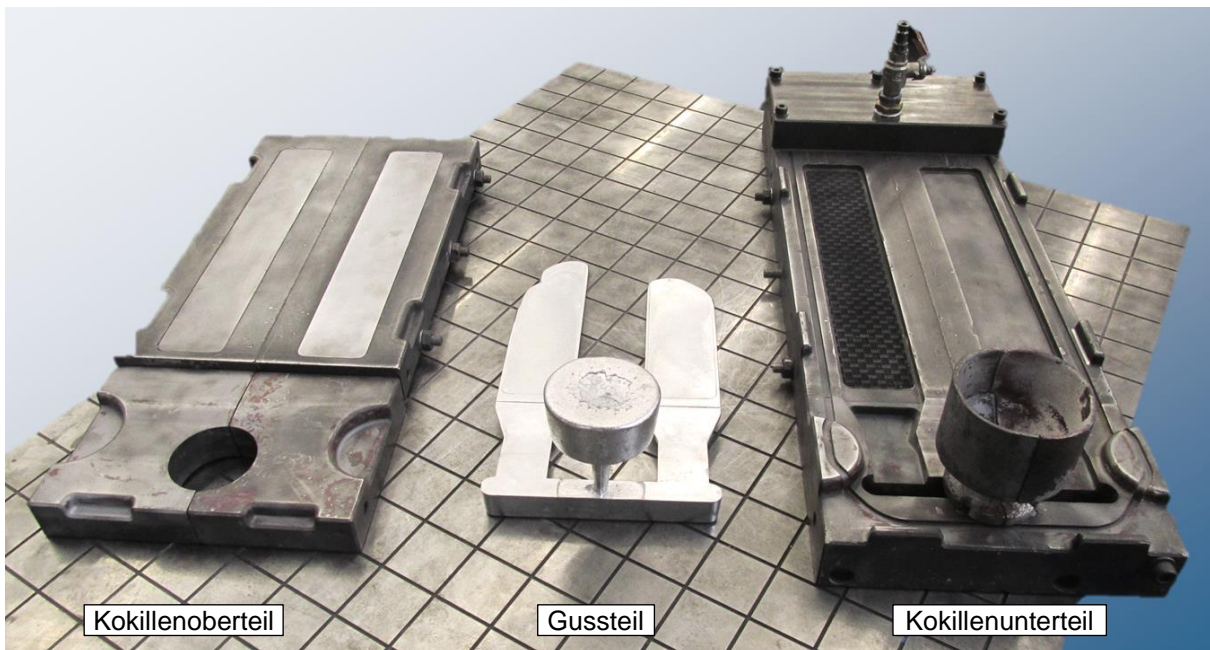


Bild 5.5: Modulare Kokille aus Ober- und Unterteil mit einem hergestellten Gussteil aus AlSi11Mg

Die modulare Kokille hatte die Abmessungen 500 mm x 250 mm x 90 mm (L x B x H) und wurde aus Warmarbeitsstahl 1.2343 (X38CrMoV5-1) mit einer Härte von 36±2 HRC gefertigt. Die Kokille bestand aus einem Kokillenoberteil und einem Kokillenunterteil, in den ein metallischer Eingießtrichter eingesetzt wurde, vgl. Bild 5.5. Über dessen untere Austrittsöffnung und die Höhe des Eingießtrichters konnte die Strömungsgeschwindigkeit sowie der metallostatische Druck am Ende der Formfüllung exakt und reproduzierbar eingestellt werden. In der Tabelle 5.2 sind die verwendeten Trichtervarianten und die resultierenden Eigenschaften zusammengefasst.

Tabelle 5.2: Übersicht der Trichtervarianten und die resultierenden Eigenschaften

| Trichtervariante | Höhe [mm] | Austrittsdurchmesser [mm] | Strömungsgeschwindigkeit [m/s] | metallostatischer Druck [Pa] |
|------------------|-----------|---------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| ohne | - | - | - | 240 |
| 1 | 90 | 6 | 0,05 - 0,20 | 2.100 |
| 2 | 90 | 10 | 0,25 - 0,45 | 2.100 |
| 3 | 90 | 20 | 0,55 - 0,70 | 2.100 |

In die beiden Kokillenhälften konnten vier Modulplatten mit den Abmessungen 350 mm x 60 mm x 20 mm (L x B x H) eingesetzt werden. In den zwei unteren Modulplatten befanden sich jeweils vier Thermoelementbohrungen mit einem Abstand von je 75 mm zueinander. Der Durchmesser betrug 3,5 mm, die Tiefe 30 mm und der Abstand zur Oberfläche bzw. zur Gussteilkavität 9 mm. Über diese acht Mantelthermoelemente (NiCr-Ni, Typ K) wurde die Kokillentemperatur eingestellt und kontrolliert. Die genaue Positionierung kann der technischen Zeichnung im Anhang I entnommen werden. Mit Hilfe des mobilen Gießtisches wurde die modulare Kokille innerhalb von 4 bis 5 Stunden auf eine Temperatur von 350 °C aufgeheizt. Die acht Thermoelemente ermöglichten die Dokumentation der Aufheizphase sowie der Zeit- Temperaturverläufe während der durchgeführten Gießversuche. Im Anhang J ist ein entsprechender Verlauf für einen Abguss dargestellt. Die Messung und Auswertung erfolgte mit einem Datenlogger der Fa. Ahlborn, Modell Almemo 2890-9.

Am hinteren Ende der Kokille wurde das dargestellte Schutzgasmodul mit Absperrhahn angeschraubt. Die Spülung der Kavität mit Argon oder Druckluft war über die hinteren Entlüftungsschlitze möglich. Eine umlaufende Nut mit Dichtring dichtete die Kokille gegenüber der Luft-Atmosphäre ab.

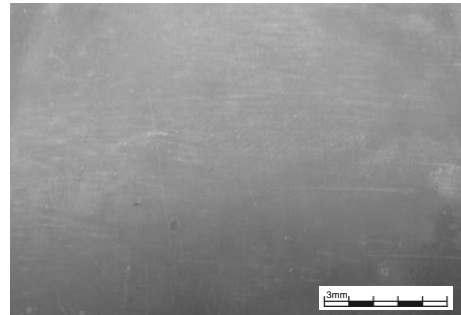
Durch den zentralen Einguss und das symmetrische Anschnittsystem konnten mit jedem Abguss zwei Gussteilplatten hergestellt werden, wodurch ein direkter Vergleich beider ermöglicht wurde. Die rechte Kokillenkavität mit glatter Oberfläche diente stets als Referenzseite. Die linke Kokillenkavität mit strukturierter Oberfläche diente als Untersuchungsseite. Die hergestellten Gussteilplatten wurden anhand der Bewertungskriterien Fließ- und Formfülllänge, Gussteilwandstärke, Strukturabbildungsvermögen und Mikrostruktur (λ_2 - Werte) analysiert.

5.2.1.3 Oberflächenstrukturen

Nachfolgend eine detaillierte Beschreibung der angefertigten und untersuchten Oberflächenstrukturen, welche in die Modulplatten eingebracht wurden. Hauptaugenmerk sind die geometrischen Abmessungen und das verwendete Fertigungsverfahren der bekannten und der neu entwickelten Oberflächenstrukturen.

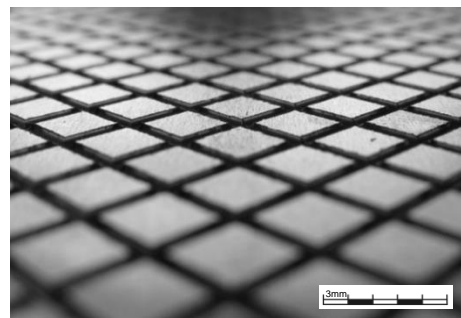
glatt

Standardmäßige Oberfläche aller gängigen Kokillen. Hergestellt wurde diese durch Fräsen (Schruppen und Schlichten) und anschließendem Glasbruchstrahlen. Der R_z -Wert betrug ca. 20 μm .



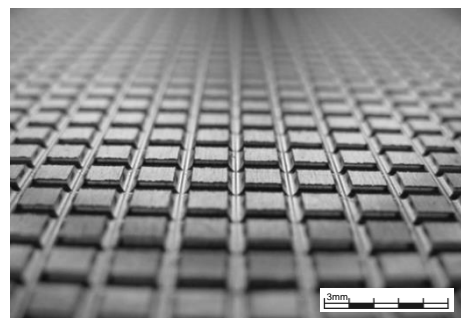
Waffel 0° und Waffel 45°

Mittels Kugelkopffräser eingebrachte halbkreisförmige Vertiefungen in Rautenform. Die Tiefe betrug 0,5 mm, die Breite 1,0 mm und der Linienabstand 5,0 mm. Es resultierte ein durchgängiges Strukturnetzwerk. In Abhängigkeit vom Anströmwinkel der Schmelze ergaben sich die Strukturen *Waffel 0°* und *Waffel 45°*.



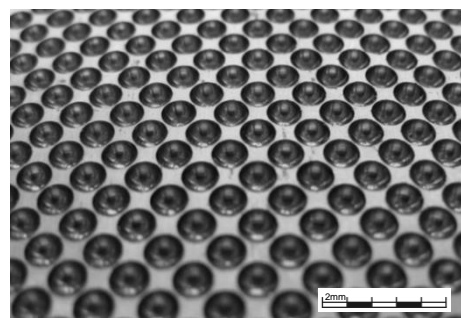
Waffel fein

In Anlehnung an das standardmäßige Waffelmuster, jedoch mit reduziertem Linienabstand (3,0 mm), ergab sich die Struktur *Waffel fein*. Die Tiefe betrug 0,5 mm und die Breite 1,0 mm.



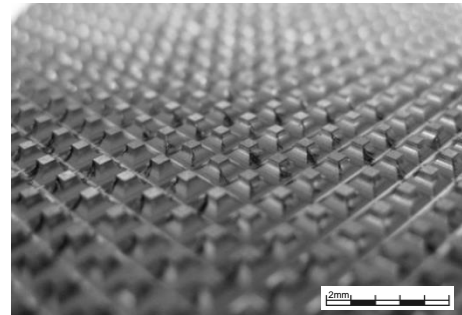
Golfball 1,0 mm, 2,0 mm und 3,0 mm

Die drei Golfballstrukturen wurden mittels Fräsen hergestellt. Hierzu wurden Kugelfräser mit einem Durchmesser von 1,0 mm, 2,0 mm und 3,0 mm verwendet. Die Tiefe betrug jeweils $D/2$. Die Golfballstrukturen zeichnen sich durch ein geschlossenes Strukturnetzwerk aus.



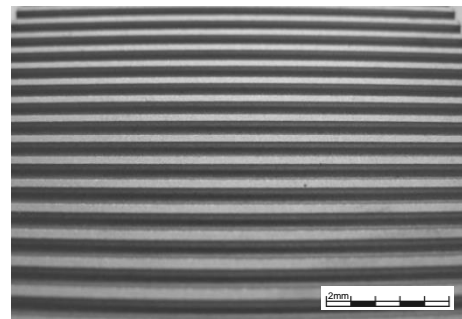
ccc 1.0 und ccc 2.0

Diese Strukturen wurden mit Kugelkopffräsern hergestellt ($D = 1,0$ mm bzw. $2,0$ mm). Die Struktur *ccc 1.0* zeichnete sich durch eine Breite von $1,0$ mm, einer Tiefe von $0,5$ mm und einem Abstand von $1,5$ mm aus. Bei der Struktur *ccc 2.0* betrug die Breite $2,0$ mm, die Tiefe $1,0$ mm und der Abstand $3,0$ mm.



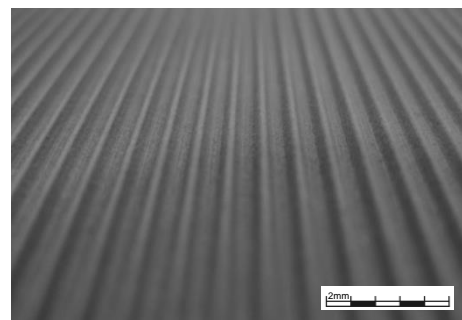
Q-Rille 1,0 mm, 2,0 mm und 4,0 mm

Die Querrillenstrukturen wurden durch Fräsen hergestellt. Die Besonderheit war die Ausrichtung quer zur Strömungsrichtung. Die halbkreisförmigen Vertiefungen besaßen die Durchmesser $1,0$ mm, $2,0$ mm und $4,0$ mm. Die Tiefe betrug jeweils $D/2$ und der Fräslinienabstand $1,5$ mm, $3,0$ mm und $6,0$ mm.



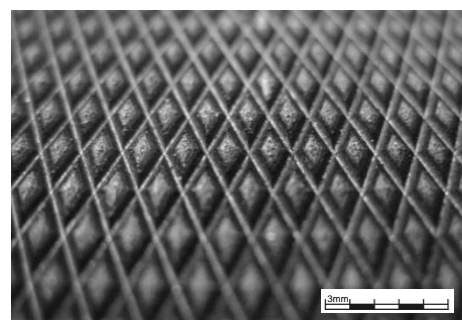
L-Rille (L) 1,5 mm und L-Rille (L) 2,0 mm

Die Längsrillenstrukturen wurden durch einen Laserstrahl (Kennzeichnung L) eingebracht. Die Besonderheit war die Ausrichtung längs zur Strömungsrichtung sowie die große Oberflächenrauheit durch den Laserprozess ($R_z \approx 50$ μm). Die halbkreisförmigen Vertiefungen hatten einen Durchmesser von $1,5$ mm und $2,0$ mm. Die Tiefe betrug jeweils $D/2$ und der Linienabstand $2,0$ mm bzw. $2,5$ mm.



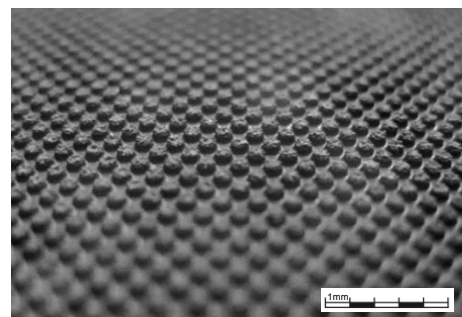
Raute (L)

Gelaserte Pyramidenstruktur mit einer rautenförmigen Grundfläche. Die Diagonallängen betragen $2,5$ mm und $5,0$ mm, die Tiefe $0,5$ mm. Die Oberflächenrauheit durch die Laserbearbeitungsprozess betrug $R_z \approx 50$ μm .



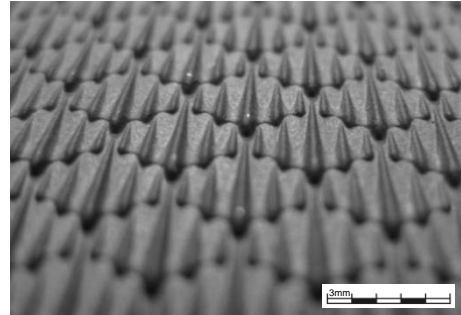
Noppe (L)

Halbkugelförmige Erhebung mit einem Durchmesser von $1,0$ mm. Der Abstand betrug $1,5$ mm. Die Noppenstruktur wurde durch einen Laserstrahl hergestellt (Kennzeichnung L). Die Oberflächenrauheit betrug $R_z \approx 50$ μm .



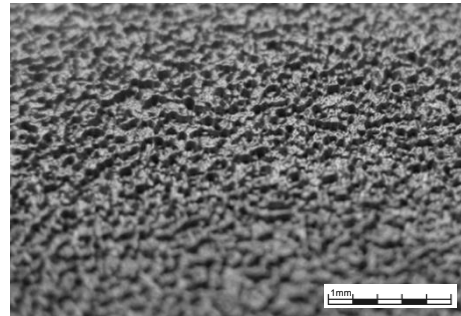
Haifisch klein, Haifisch grob und Haifisch grob 90°

Die Größe der Elementarzellen betragen 4,8 mm (*Haifisch klein*) und 6,4 mm (*Haifisch grob*). Die maximale Strukturhöhe betrug 0,8 mm. Die Anfertigung erfolgte durch einen Laserstrahl mit einer resultierenden Oberflächenrauheit von $R_z \approx 50 \mu\text{m}$. Die Anströmrichtung war längs zur Struktur. Die Struktur *Haifisch grob 90°* wurde quer unter einem Winkel von 90° angeströmt.



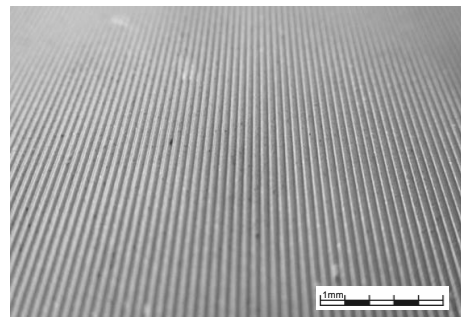
Laser diffus

Diffuse Oberflächenstruktur, welche gezielt durch einen Laserstrahl aufgeraut wurde. Die Oberflächenrauheit betrug $R_z \approx 100 \mu\text{m}$. Die Oberfläche war durch zahlreiche kraterartige Vertiefungen charakterisiert. Es existierte kein richtungsabhängiger Anströmwinkel.



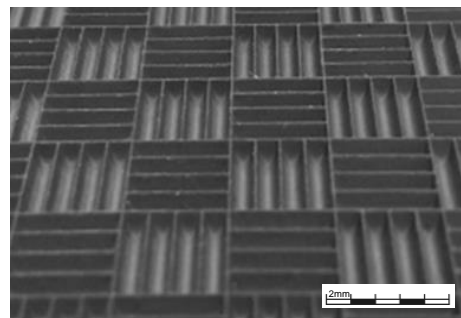
L-Rille 0,5 mm, 1,0 mm, 1,5 mm und 2,0 mm

Durch (Mikro-)Fräsen hergestellte halbkreisförmige Längsrillen mit den Durchmessern 0,5 mm, 1,0 mm, 1,5 mm und 2,0 mm. Die Tiefe betrug jeweils $D/2$. Die Fräslinienabstände wurden mit 0,7 mm, 1,2 mm, 1,7 mm bzw. 2,2 mm definiert, wodurch ein schmaler Steg von 0,2 mm erhalten blieb. Die Anströmrichtung war längs zur Oberflächenstruktur.



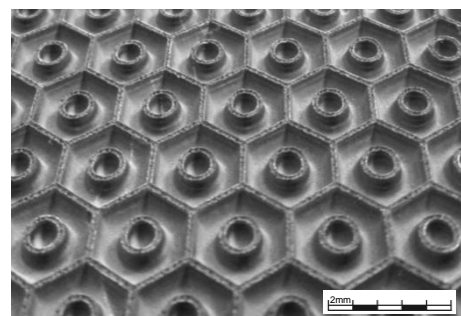
Carbon

Eine Oberflächenstruktur, welche durch einen Laserstrahl hergestellt wurde. Die Struktur hatte eine Breite von 1,5 mm und eine Tiefe von 2,0 mm. Die Stegbreite betrug 0,2 mm. Vier parallele Vertiefungen ergaben eine Elementarzelle, welche durch eine 90° Drehung zu der Struktur *Carbon* kombiniert wurden. Die Struktur zeichnete sich durch ein geschlossenes Strukturnetzwerk aus und war richtungsunabhängig.



Eagle Eye

Die hexagonale Struktur besitzt in der Mitte einen Kreisring. Der Strukturabstand und die Tiefe betragen 2,0 mm und die Stegbreite 0,5 mm. Die Oberfläche des Stegs wurde mit der Struktur *Laser diffus* überlagert und aufgeraut. Die Struktur zeichnete sich durch ein geschlossenes, richtungsunabhängiges Strukturnetzwerk aus.



5.2.2 Durchführung

Mit der modularen Kokille wurden die Gießversuche zur Ermittlung der strukturabhängigen Fließ- und Formfülllängen durchgeführt. Diese Untersuchungen waren aufbauend auf bereits durchgeführte und veröffentlichte Untersuchungsergebnisse von Gierth und Knorr [37; 94; 111].

Die linke Kavität in der modularen Kokille diente als Referenzseite. Diese war durch eine unstrukturierte Unter- und Oberseite charakterisiert. Die rechte Kavität diente als Untersuchungsseite und zeichnete sich durch eine strukturierte Unterseite und eine unstrukturierte Oberseite aus.

Die komplette Kokille und alle strukturierten Modulplatten wurden vor den Gießversuchen mit Glasbruch (200 bis 300 μm Körnung) gestrahlt. Ziel war die Sicherstellung einer gleichmäßigen Oberflächenrauheit über alle Versuchsreihen. Die erzielte Rauheit durch das Glasbruchstrahlen betrug ca. $R_z \approx 20 \mu\text{m}$ [94]. Die in dieser Arbeit beschriebenen Gießversuche wurden ohne Schlichte durchgeführt. Ziel war die Eliminierung des Schlichteeinflusses auf die Untersuchungsergebnisse. Einzig die Oberflächenstrukturen sollten Einfluss auf die Fließ- und Formfülllänge der Gussteile ausüben. Die Kombination aus Schlichte und Oberflächenstrukturen und deren Einfluss auf die gießtechnologischen Eigenschaften kann [94] entnommen werden.

In Tabelle 5.3 sind die Randbedingungen der Gießversuche zur Ermittlung der Fließ- und Formfülllängen aufgelistet. Für die Untersuchungen wurde eine primäre AlSi11Mg-Legierung verwendet. Rohstofflieferanten waren Slovalco, Hydro und Trimet Aluminium. Auf weitere kornfeinende, veredelnde und reinigende Maßnahmen wurde verzichtet. Die chemische Zusammensetzung der verwendeten Aluminiumlegierung ist in Tabelle 5.4 dargestellt. Diese wurde stichprobenartig durch Spektralanalysen kontrolliert.

Tabelle 5.3: Parameter der Gießversuche zur Ermittlung der Fließ- und Formfülllänge

| Parameter | Größe |
|-------------------------------------|--|
| Kokillenwerkstoff | X38CrMoV5-1 |
| Kokillentemperatur | $350 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ |
| Kokillenschlichte | nein |
| Kokillenaufbereitung | Glasbruchstrahlen (Körnung 200 bis 300 μm) |
| Rauheit der Kokillenoberflächen | $R_z \approx 20 \mu\text{m}$ [94] |
| Legierung | AlSi11Mg |
| Hersteller | Slovalco, Hydro und Trimet |
| Legierungstyp | primär |
| Reinigung/ Spülung | nein |
| zusätzliche Kornfeinung/ Veredelung | nein |
| Gießtemperatur | $780 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ |

Tabelle 5.4: Chemische Zusammensetzung der vergossenen AISi11Mg-Legierung (TL 118) [161]

| Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Ti | Sr | Na | Zn | Al |
|---------------|--------------|--------------|----------------|--------------|--------------|-----------------|--------------|--------------|------|
| 10,7- 11,3 | max. 0,15 | max. 0,05 | 0,3- 0,5 Fe | 0,24- 0,3 | 0,1- 0,15 | 0,022- 0,028 | max. 0,02 | max. 0,05 | Rest |

5.2.3 Auswertung

Bild 5.6 zeigt ein schematisches Gussteil mit entsprechender Beschriftung zur Charakterisierung und Bewertung der gießtechnologischen Ergebnisse. Die wichtigsten Messgrößen waren die Fließ- und Formfülllänge, die Gussteilwandstärke und das Strukturabbildungsvermögen.

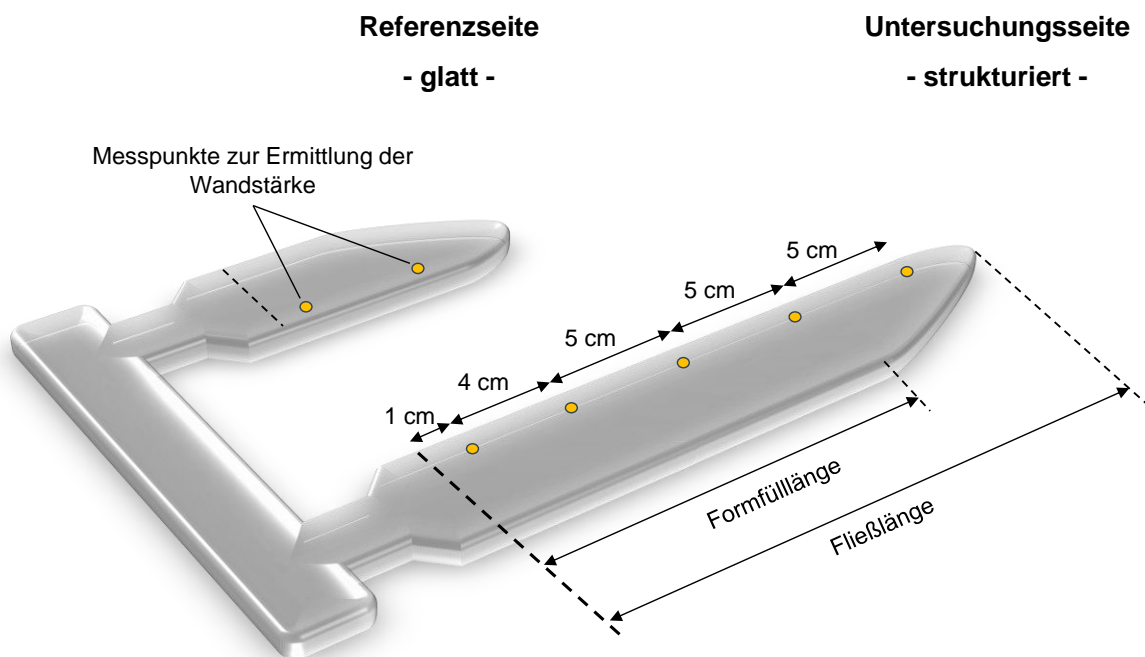


Bild 5.6: Schematisches Gussteil mit entsprechender Bezeichnung zur Charakterisierung

Die Fließlänge wurde definiert als die maximale Länge des Gussteiles. Gemessen wurde ab dem oberflächenstrukturierten Bereich. Die Formfülllänge wurde definiert als die maximale Länge des Gussteiles mit scharfkantig abgebildeter Kokillenkontur. Bei jedem Gussteil wurde die maximale Wandstärke an den entsprechend festgelegten Messpunkten analysiert und dokumentiert. Die maximal gemessene Wandstärke war unter anderem ein Maß für das Abbildungsvermögen der Oberflächenstrukturen durch die Schmelze.

Zur Ermittlung der strukturabhängigen Fließ- und Formfülllängen wurden 26 Oberflächen bzw. Oberflächenstrukturen im Gießversuch mit der modularen Kokille erprobt. Je Konfiguration wurden mindestens sechs Gussteile hergestellt und analysiert. Bild 5.7 zeigt die Auswertung der Gießversuche. Zu sehen sind die normierten, strukturabhängigen Fließ- und Formfülllängen (Säulen). Die glatte Oberfläche diente als Referenz (100 %; 6,0 mm). Des Weiteren sind die gemittelten, maximalen Gussteilwandstärken dargestellt, welche aus den untersuchten Oberflächenstrukturen resultierten (Punkte).

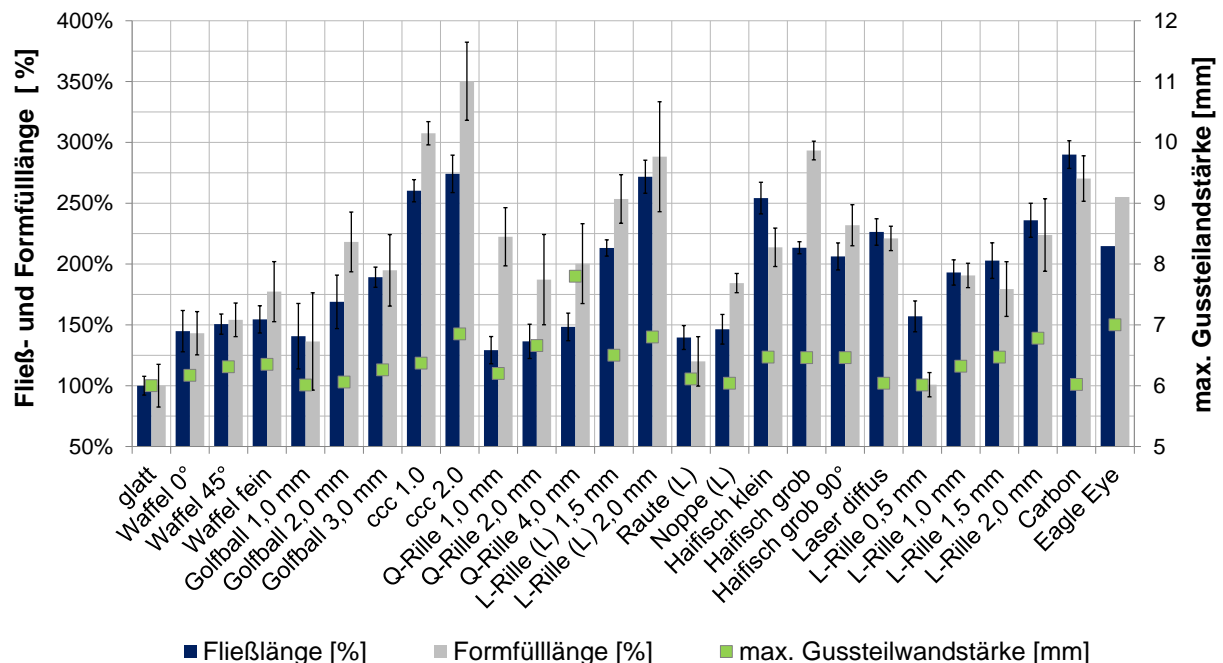


Bild 5.7: Normierte Fließ- und Formfülllänge sowie maximale Gussteilwandstärke

Die Darstellung verdeutlicht, dass keine Oberflächenstruktur einen negativen Einfluss auf die Fließ- und Formfülllänge ausübte. Mit den drei Waffelmusterstrukturen *Waffel 0°*, *Waffel 45°* und *Waffel fein* konnten gegenüber der glatten Oberfläche Fließlängen im Bereich von 150 % bis 160 % erzielt werden. Dies konnte auch bei der Formfülllänge nachgewiesen werden.

Mit der Vergrößerung der Golfballstruktur ($\varnothing 1,0 \text{ mm} \rightarrow \varnothing 2,0 \text{ mm} \rightarrow \varnothing 3,0 \text{ mm}$) verbesserte sich die Fließlänge von 140 % über 160 % auf bis zu 190 %. Die Wandstärkenzunahme war hier vernachlässigbar gering ($< 0,2 \text{ mm}$). Die Oberflächenstrukturen wurden nicht gefüllt. Parallel konnte die Formfülllänge deutlich auf bis zu 230 % mit der Struktur *Golfball 2,0 mm* gesteigert werden.

Die Oberflächenstrukturen *ccc 1,0* und *ccc 2,0* zeigten deutliche Verbesserungen gegenüber der glatten Oberfläche. Hier konnten Fließlängen von 230 % und 250 % und Formfülllängen von 310 % und 250 % generiert werden. Die beiden untersuchten Oberflächenstrukturen wurden sehr gut durch die Schmelze abgebildet, wodurch die maximalen Gussteilwandstärken von 6,0 mm auf 6,4 mm und 6,9 mm anstiegen.

Q-Rille 1,0 mm, *Q-Rille 2,0 mm* und *Q-Rille 4,0 mm* verzeichneten nur einen geringen Anstieg der Fließ- und Formfülllängen mit Zunahme der Strukturgröße. Die Verbesserungen lagen unter +40 %.

Mit den drei Strukturen *Haifisch klein*, *Haifisch grob* und *Haifisch grob 90°* wurden ebenfalls deutliche Verbesserungen bei den Fließ- und Formfülllängen erreicht. Die Fließlänge konnte auf 250 % (*Haifisch klein*) und die Formfülllänge auf 290 % (*Haifisch grob*) gesteigert werden. Durch die Struktur *Haifisch grob 90°* zeigte sich, dass es bei diesem Strukturtyp **keine** signifikante Richtungsabhängigkeit gab. Die generierten Ergebnisse bezüglich Fließlänge waren nahezu identisch ($\Delta = 7\%$). Bei der Formfülllänge ergab sich eine Differenz von $\Delta = 60\%$. Durch die Oberflächenstrukturen *Haifisch klein*, *Haifisch grob* und *Haifisch grob 90°* stiegen die maximalen Gussteilwandstärken von 6,0 mm auf 6,5 mm.

Um den positiven Einfluss der Strukturskalierung weiter zu untermauern, wurden die gefrästen Strukturen *L-Rille 0,5 mm*, *L-Rille 1,0 mm*, *L-Rille 1,5 mm* und *L-Rille 2,0 mm* untersucht. Wie zu erwarten, verbesserten sich die Fließ- und Formfülllänge mit Zunahme der Strukturgröße. Mit den Strukturen *L-Rille 1,5 mm* und *L-Rille 2,0 mm* konnten Fließlängen von 220 % und 240 % erreicht werden.

Die gelaserten Strukturen *L-Rille (L) 1,5 mm* und *L-Rille (L) 2,0 mm* konnten die Fließlängen gegenüber den gefrästen Varianten nochmals um +10 % und +36 % steigern. Es zeigte sich, dass das Fertigungsverfahren einen entsprechenden Einfluss auf die gießtechnologischen Eigenschaften ausübte. Die Gussteilvermessungen ergaben im Mittel Wandstärken von 6,2 mm und 6,7 mm.

Die Strukturen *Eagle Eye* und *Carbon* stellen verbesserte Strukturen dar, mit denen die Fließ- und Formfülllängen im Vergleich zu den bisher beschriebenen Strukturen nochmals deutlich verbessert werden konnten, ohne eine signifikante Zunahme der Gussteilwandstärke. Die erzielten Verbesserungen lagen deutlich über 250 % im Vergleich zu einer glatten Oberfläche. Die ermittelte Wandstärke bei der Struktur *Carbon* lag im Mittel bei 6,05 mm.

Bei den durchgeführten Gießversuchen lagen die prozentualen Fehler für die Fließ- und Formfülllängen im Mittel bei 12 % bzw. 21 %. Eine tabellarische Übersicht der wichtigsten Ergebnisse kann dem Anhang K entnommen werden.

5.3 Zusammenfassung

Die durchgeführten numerischen und experimentellen Grundlagenuntersuchungen zur Potenzialanalyse haben gezeigt, dass die Oberflächenstrukturen die Fließ- und Formfülllänge positiv beeinflussen. Eine signifikante Abhängigkeit zwischen der Fließlänge und der Größenskalierung der Oberflächenstrukturen konnte identifiziert werden. Die entsprechende Ergebnisgegenüberstellung kann Bild 5.8 entnommen werden. Dargestellt sind die prozentualen Fließlängen aus den numerischen (hellblau) und den experimentellen (dunkelblau) Untersuchungen. Es ist ein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Untersuchungsmethoden zu erkennen.

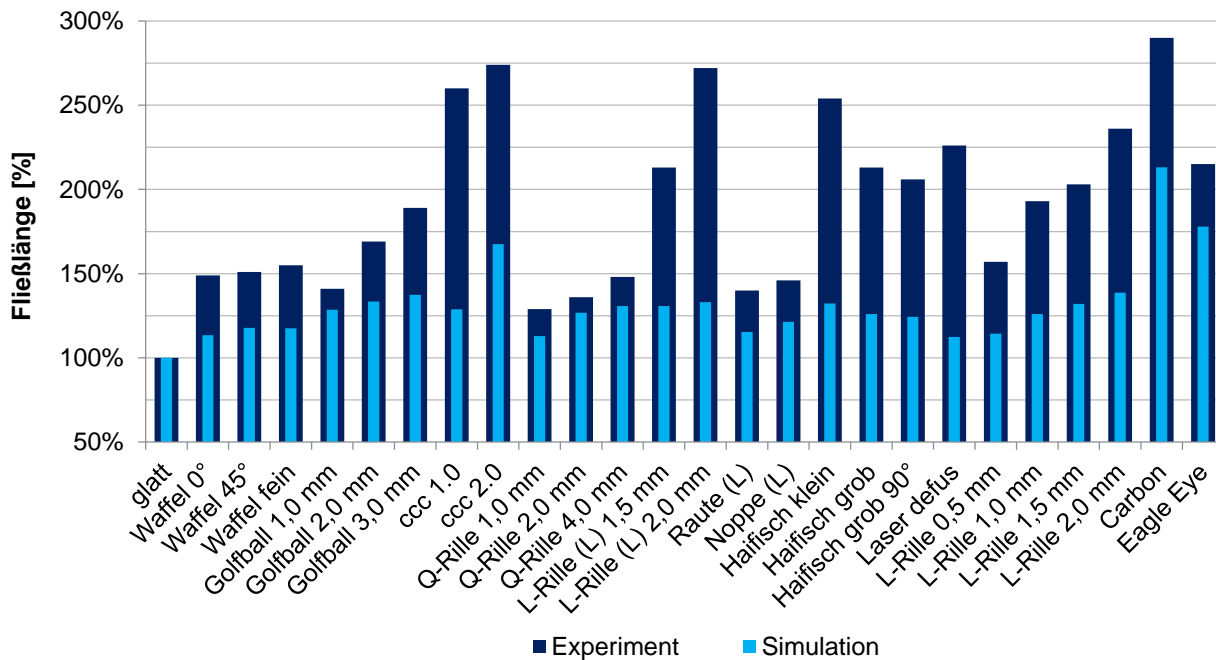


Bild 5.8: Ergebnisgegenüberstellung der ermittelten Fließlängen aus Simulation und Experiment

Die Abweichungen zwischen Simulation und Experiment können wie folgt erklärt werden:

- Das Berechnungsmodell *Fließlänge* wurde nach oben und unten durch eine konstante Wandtemperatur begrenzt (350 °C), wodurch sich ein deutlich höherer Wärmestrom einstellte. Bei den experimentellen Gießversuchen resultierte eine höhere Wärmeindringtiefe und somit ein kleinerer Temperaturgradient im oberflächennahen Bereich der Kokille.
- Die Gießtemperatur wurde in der Simulation sehr niedrig gewählt (575 °C), um die maximale Fließlänge und somit die Abmessung des Berechnungsmodells zu reduzieren. In den Experimenten lag die Eingießtemperatur der Schmelze mit 780°C deutlich höher.
- Die Einströmgeschwindigkeit in das Berechnungsmodell wurde als konstant (0,075 m/s) definiert. Die modulare Kokille besitzt zwei kommunizierende Kavitäten (Referenz- und Untersuchungsseite). Friert die Schmelze in einer Kavität vorzeitig ab, resultiert in der zweiten Kavität aufgrund des Bernoulli-Gesetzes ein Geschwindigkeitsanstieg, wodurch die Fließlänge gesteigert wurde.
- Im Berechnungsmodell *Fließlänge* wurden die Oberflächenrauheiten, welche aus den Fertigungsverfahren Fräsen und Laserstrahl resultierten, nur vereinfacht über die Kontaktfläche beschrieben. Aufgrund dieser Vereinfachung kann eine deutliche Differenz zwischen den numerisch und experimentell ermittelten Fließlängen angenommen werden.

Die durchgeführten Voruntersuchungen zur Potenzialanalyse zeigten, dass die Thesen bezüglich der Wirkmechanismen Wärmeisolation, Wärmeabfuhr und Aufreißen der Oxidhaut als wahrscheinlich gelten. Zu diesen drei Wirkmechanismen werden nachfolgend Untersuchungen auf numerischer und experimenteller Ebene durchgeführt. Ziel ist die Be- und Widerlegung der folgenden Indizien aus den durchgeführten Voruntersuchungen zur Potenzialanalyse:

- Die Oberflächenstrukturen werden während des Formfüllvorganges überströmt.
- Das Überströmen reduziert die Kontaktfläche zwischen Schmelze und Kokille.
- Durch das Überströmen entstehen wärmeisolierende Luftspalte.
- Füllung der Strukturen erfolgt durch einen Druckanstieg in der Kavität.
- Oberflächenstrukturen reduzieren die Erstarrungsdauer der Schmelze.

6 Hauptuntersuchung – Analyse Wirkmechanismen

6.1 Wärmeisolation

6.1.1 Simulation

Das Fließen von Schmelzen basiert auf thermodynamischen und strömungsmechanischen Naturgesetzen. Zwischen der Schmelze und der Kokillenoberfläche (glatt bzw. strukturiert) existiert ein Wärmeübergang und ein gerichteter Wärmestrom stellt sich ein. Dies führt zu einer stetigen Abkühlung der Schmelze.

Der Einfluss der Oberflächenstrukturen auf den Wärmestrom wurde, im Vergleich zu einer glatten Oberfläche, durch sogenannte Durchströmversuche untersucht. Ziel war das Erreichen eines quasi-stationären Temperaturzustands. Ein Gleichgewichtszustand zeichnet sich dadurch aus, dass sich die Temperatur im Beobachtungszeitraum nicht mehr ändert. Hierdurch sollte eine Analyse des Wärmestromes \dot{Q} bzw. der Wärmestromdichte \dot{q} ermöglicht werden. Hierbei gilt:

$$Q = c_p \cdot m \cdot \Delta T \quad (6.1)$$

$$\dot{Q}(t) = \frac{dQ(t)}{dt} \quad (6.2)$$

$$\dot{q}(t) = \frac{d\dot{Q}(t)}{dA} \quad (6.3)$$

Zur Analyse des strukturabhängigen Wärmestroms wurde ein Berechnungsmodell, genannt *Durchströmung*, aufgebaut, vgl. Bild 6.1. Grau ist die Kokille und farbig ist die Strömungsgeschwindigkeit der Schmelze über die Oberflächenstruktur *Waffel 45°* dargestellt.

Das Modell hatte die Abmessungen 50 mm x 8 mm x 235 mm (L x B x H). Die Schmelze durchströmte den Gießkanal von **x-min** nach **x-max** mit einer Geschwindigkeit von 0,075 m/s. Dieser hatte die Abmessungen 50 mm x 8 mm x 3 mm (L x B x H). Die Symmetriebedingung **z-max** begrenzte das Berechnungsmodell nach oben. Die Kokille war gekennzeichnet durch eine Dicke von 205 mm. **Z-min** wurde als konstante Wandbedingung mit 350 °C definiert. Die einströmende Schmelze hatte eine Temperatur von 650 °C. Symmetriebedingungen in den Ebenen **y-min** und **y-max** begrenzen das Berechnungsmodell nach links und rechts. Zur Vernetzung wurden insgesamt fünf Vernetzungsblöcke verwendet. Hierbei wurde die Kokillenoberfläche am feinsten vernetzt (Kantenlänge 0,125 mm). Mit zunehmendem Abstand zur Kokillenoberfläche wurde die Kantenlänge der Vernetzungselemente verdoppelt. Der unterste Bereich des Modells wies Elemente mit einer Größe von 2,0 mm auf. Die Gesamt-Elementanzahl betrug ca. 780.000.

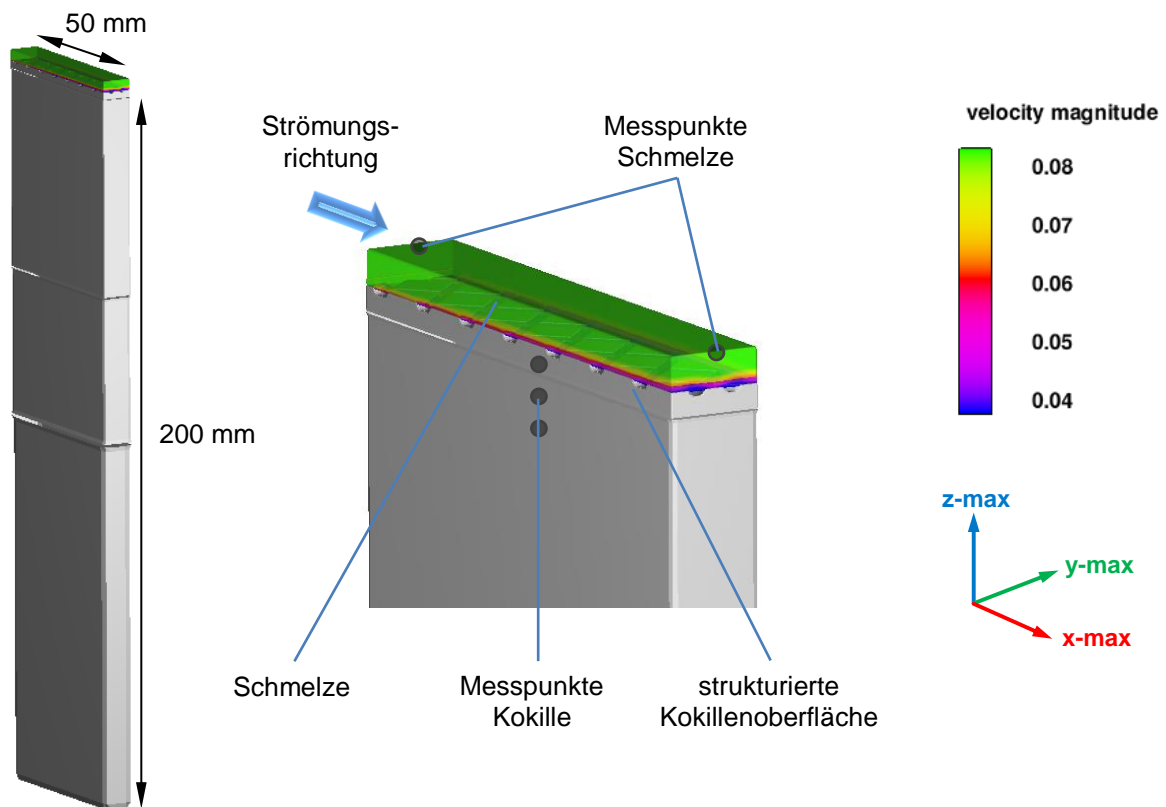


Bild 6.1: Berechnungsmodell *Durchströmung*. Gesamtansicht (links) und vergrößerte Darstellung des Gießkanals mit strömender Schmelze (rechts)

Das Berechnungsmodell *Durchströmung* berücksichtigt beim Überströmen der Oberflächenstrukturen die Ausbildung einer dünnen Wärmeisolationsschicht aus „Luft“. Diese wurde durch eine zusätzliche Komponente mit entsprechend definierten thermophysikalischen Eigenschaften vereinfacht beschrieben. Tabelle 10.6 im Anhang L können die wichtigsten Parameter und Größen des Simulationsmodelles entnommen werden.

Zur Ermittlung der Temperaturverläufe in der Kokille und im Gießkanal wurden fünf Messpunkte definiert. Diese befanden sich, wie in Bild 6.1 dargestellt, im Ein- und Ausströmbereich der Schmelze und im Kokillenunterteil. Der Abstand des obersten Messpunktes zur Kokillenoberfläche sowie der Abstand der Messpunkte untereinander, betrug jeweils 1,0 mm.

Die Dicke der Kokille sollte sicherstellen, dass nach einer Simulationsdauer von 600 s ein quasistationärer Temperaturzustand in dem oberflächennahen Bereich der Kokille und in der Schmelze erreicht wurde. Der Zeit-Temperaturverlauf sowie der quasistationäre Gleichgewichtszustand nach 600 s ist für eine glatte Oberfläche im Bild 6.2 dargestellt.

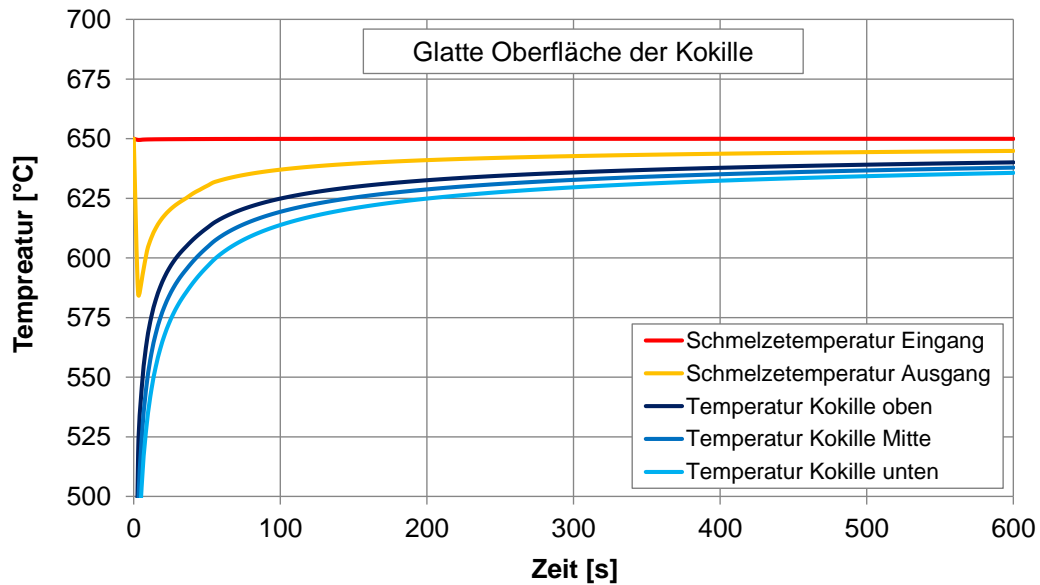


Bild 6.2: Zeit-Temperaturverläufe der fünf Messpunkte in der Kokille und in der Schmelze

Mit dem Simulationsmodell *Durchströmung* wurden die Oberflächenstrukturen *glatt*, *Waffel 45°*, *ccc 1.0*, *ccc 2.0*, *Golfball 1,0 mm*, *Golfball 2,0 mm*, *Golfball 3,0 mm*, *L-Rille 1,0 mm*, *L-Rille 1,5 mm*, *L-Rille 2,0 mm*, *Haifisch grob* und *Noppe (L)* analysiert. Aufgrund der Berechnungszeiten wurde der Simulationsumfang auf diese Oberflächenstrukturen begrenzt.

Bild 6.3 zeigt die Untersuchungsergebnisse der Durchströmversuche. Dargestellt sind die numerisch ermittelten Fließlängen [%] (vgl. Kapitel 5.1.3) sowie die strukturabhängigen Wärmeströme \dot{Q} [%] in die Kokille. Zur besseren Vergleichbarkeit sind die Fließlängen und die Wärmeströme normiert dargestellt. Als Referenz diente die Kokille mit der glatten Oberfläche, welche einen Wärmestrom von $22,32 \text{ J}\cdot\text{s}^{-1}$ aufwies. Dies entspricht 100 % und ist im Diagramm links sowie durch die grüne Linie dargestellt (Bild 6.3).

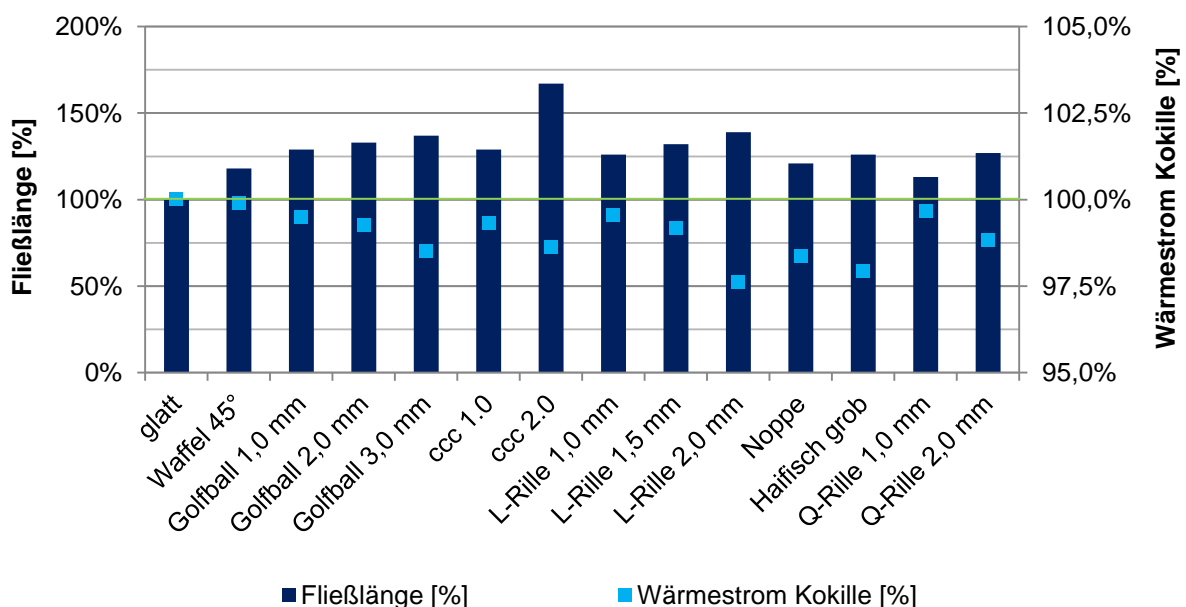


Bild 6.3: Numerisch ermittelte Fließlängen und strukturabhängige Wärmeströme in die Kokille

Anhand des Diagrammes lässt sich eine Tendenz erkennen, dass eine gesteigerte Fließlänge durch eine Reduzierung des Wärmestromes von der Schmelze in die Kokille erreicht werden kann. Dies zeigte sich am deutlichsten bei den Strukturen mit hohem Fließlängenpotenzial gegenüber einer glatten Oberfläche, wie bei *ccc 2.0*, *L-Rille 1,0 mm*, *L-Rille 1,5 mm*, *L-Rille 2,0 mm* und *Haifisch grob*.

Bild 6.4 verdeutlicht die Abhängigkeit der Fließlänge vom Wärmestrom in die Kokille. Es ergab sich ein logarithmischer Zusammenhang mit der Funktion $y = -12,17 \ln(x) + 1,1414$ bei einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,57$. Ausreißer bildete die Struktur *ccc 2.0*. Dies kann mit der Strukturcharakteristik erklärt werden. Das offene Strukturnetzwerk mit einer Breite von 2,0 mm und einer Tiefe von 1,0 mm, welches fast vollständig durchströmt wurde, vergrößerte den Volumenstrom der Schmelze durch den Gießkanalquerschnitt überdurchschnittlich.

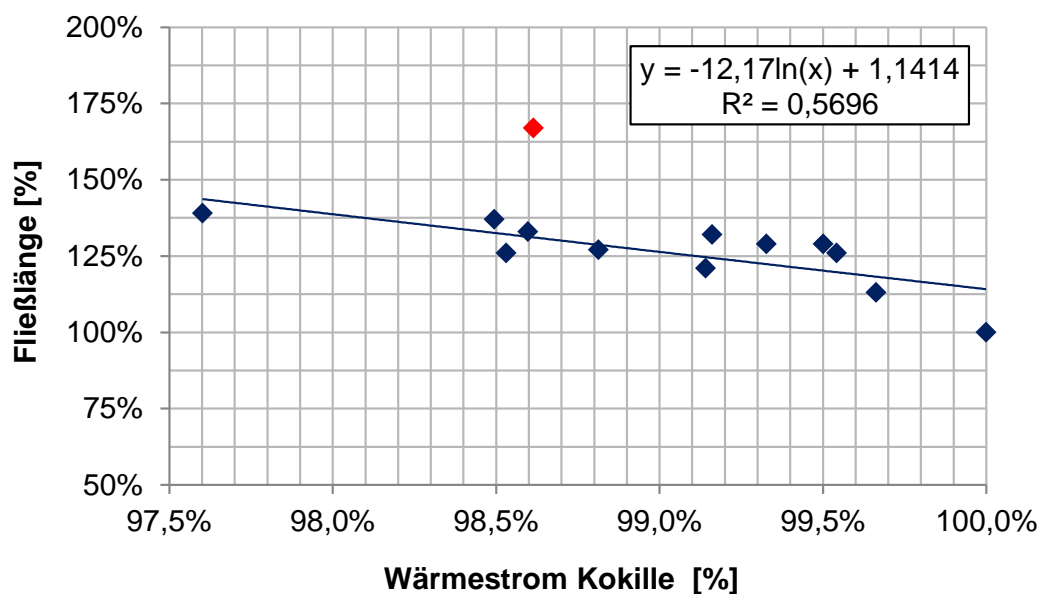


Bild 6.4: Normierte, strukturabhängige Fließlänge über dem Wärmestrom in der Kokille

Die weiteren Abweichungen zwischen Fließlänge und Wärmestrom sind der Untersuchungs- und Auswertemethodik geschuldet. Die Ermittlung des Wärmestromes basierte auf einer punktuellen Temperaturdifferenzmessung in der Schmelze. Eine weitere Fehlerquelle resultiert aus der Annahme des quasistationären Gleichgewichtszustandes nach 600 s Simulationszeit und der resultierenden Kontaktfläche zwischen strömender Schmelze und der Kokille. Diese unterlag den thermodynamischen und strömungsmechanischen Vorgängen während der Strömungssimulation.

6.1.2 Experiment

6.1.2.1 Thermographieaufnahmen

Die durchgeführten numerischen Untersuchungen zeigten, dass der Wärmestrom in die Kokille durch eine Oberflächenstruktur beeinflusst werden kann. Eine Reduzierung kann durch eine Wärmeisolation zwischen der Schmelze und der Kokille erreicht werden.

Zum Nachweis der Wärmeisolation durch eine Oberflächenstruktur wurde die modulare Kokille für Thermographie- und Hochgeschwindigkeitsaufnahmen umgebaut, vgl. Bild 6.5. Hierzu wurde die rechte Kavität durch zwei Drahterodierschnitte längs zur Fließrichtung geöffnet. Vor den Gießversuchen wurden zwei Metallrahmen mit thermoschockbeständigen Gläsern verschraubt. Die linke Kavität wurde mit einem Stopfen abgedichtet.

Ziel der Thermographie- und Hochgeschwindigkeitsaufnahmen war es, die Wärmeisolation durch das Überströmen der Oberflächenstrukturen durch die Schmelze zu dokumentieren. Hauptaugenmerk war das zeitliche und örtliche Formfüllungsverhalten in der Kavität.

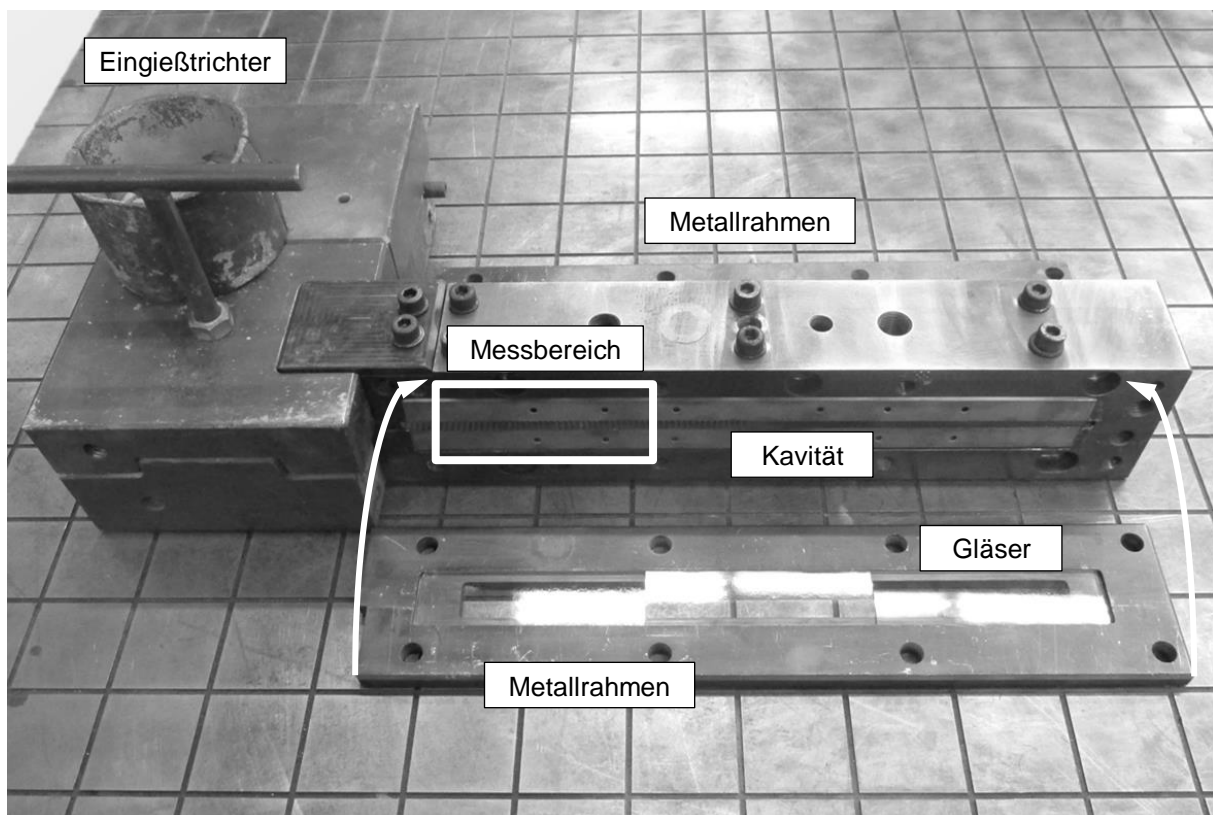


Bild 6.5: Umbau modulare Kokille für Thermographie- und Hochgeschwindigkeitsaufnahmen [159]

Für die Thermographieaufnahmen wurde die Kamera ImageIR8300 der Fa. Infratec verwendet und jeweils der markierte Messbereich betrachtet. Aufgrund des detektierbaren Spektralbereiches der ImageIR8300 (2,0 μm bis 5,5 μm [162]), wurden für die Aufnahmen Saphirgläser der Fa. Stettler Sapphire verwendet. Diese Gläser besaßen eine Lichtdurchlässigkeit von 85 % und waren im Infrarotbe-

reich (0.75 μm bis 5 μm) durchlässig, Datenblatt siehe Anhang M [163]. Sie eigneten sich somit sehr gut für die Thermographieaufnahmen. Die Qualität der Aufnahmen war primär von der Bildfrequenz, der Auflösung der Aufnahmen, der Fokussierung und des kalibrierten Temperaturbereiches abhängig. Allgemein galt [162; 164]:

- | | | |
|---------------------|---|---|
| ▪ Hohe Bildfrequenz | → | niedrige Auflösung |
| ▪ Hohe Auflösung | → | geringe Bildfrequenz |
| ▪ Temperaturbereich | → | klare Abgrenzung der Temperaturen |
| ▪ Emissionsgrad | → | Werteverzerrung durch Stoffwerte für Transmission, Reflexion und Absorption |

Die Größe des Bildausschnittes betrug 800 x 258 Pixel. Hieraus ergab sich eine Aufnahme­frequenz von bis zu 1.100 Bildern pro Sekunde. Als Objektiv wurde ein 100 mm Objektiv mit entsprechendem Makroadapter verwendet. Der kalibrierte Temperaturbereich der ImagerR8300 betrug 350 °C bis 800 °C. Die Auswertung der Messergebnisse erfolgte mit der Software Irbis3Plus von der Fa. Infracore. Die Infrarotmessung mittels Thermographie war von der Oberflächenbeschaffenheit und dem Betrachtungswinkel abhängig. Die Schwierigkeit, Aluminiumschmelzen während des Gießvorganges zu thermographieren, lag an der glänzenden, spiegelnden Oberfläche, gleichbedeutend mit einer sehr geringen Emissivität. Dem flüssigen Aluminium konnte kein konstanter Emissionsgrad zugewiesen werden, da sich während des Gießvorganges eine Oxidhaut bildete, welche die Emissivität stetig erhöhte. Die einsetzende Erstarrung und Schwindung des Aluminiums erzeugte eine raue und aufgeworfene Oberflächentopographie, wodurch sich die Emissivität weiter erhöhte. Wegen der niedrigen, oxidabhängigen, stark schwankenden Emissivität waren die Infrarotmessungen an Aluminiumschmelzen sehr ungenau, vgl. Emissionsgradtabelle in [165].

Aufgrund der beschriebenen Messproblematik war das Primärziel der Thermographieaufnahmen das zeitliche und örtliche Füllen der Oberflächenstrukturen zu dokumentieren. Das Resultat bildeten vergleichende Thermographieaufnahmen.

Für die nachfolgenden Gießversuche wurden ausschließlich die Oberflächenstrukturen *Q-Rille 1,0 mm*, *Q-Rille 2,0 mm* und *Q-Rille 4,0 mm* verwendet, vgl. Bild 6.6. Lediglich diese drei Strukturen eigneten sich für die Thermographieaufnahmen. Des Weiteren wurden die gleichen Randbedingungen und Gießparameter wie bei den Voruntersuchungen zur Potenzialanalyse in Kapitel 5.2.2. verwendet.

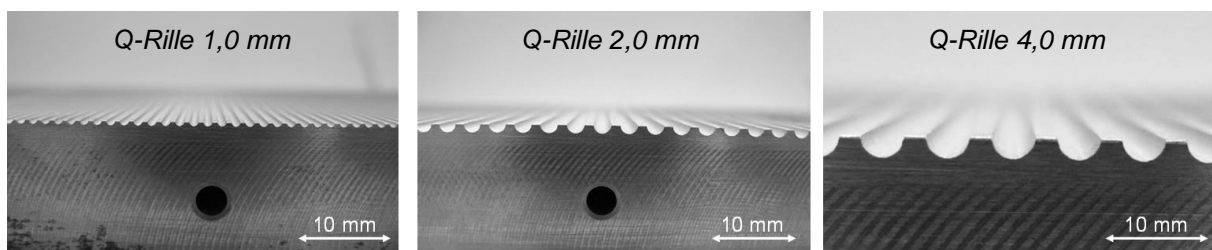


Bild 6.6: Verwendete Oberflächenstrukturen für die Thermographieaufnahmen

Tabelle 6.1 stellt eine Übersicht der Versuchskonfigurationen der Thermographieaufnahmen sowie die Ergebnisse während der Formfüllung gegenüber. Hierbei waren die wichtigsten Einflussgrößen die Struktur, die Strömungsgeschwindigkeit, resultierend aus dem verwendeten Eingießtrichter und die Füllung der Oberflächenstrukturen während des Formfüllvorganges.

Tabelle 6.1: Übersicht der Versuchskonfigurationen der Thermographieaufnahmen

| Versuchsnummer Thermographie | Struktur oben Struktur unten | Strömungs- geschwindigkeit [m/s] | Ergebnis während der Formfüllung |
|---|---|---|--|
| TH-V01 | Q-Rille 1,0 mm Q-Rille 1,0 mm | 0,15 - 0,20 | Strukturfüllung Strukturfüllung |
| TH-V02 | Q-Rille 1,0 mm Q-Rille 1,0 mm | 0,35 - 0,45 | Strukturfüllung Strukturfüllung |
| TH-V03 | Q-Rille 1,0 mm Q-Rille 1,0 mm | 0,60 - 0,70 | Strukturfüllung Strukturfüllung |
| TH-V04 | Q-Rille 2,0 mm Q-Rille 2,0 mm | 0,15 - 0,20 | Teil-Strukturfüllung Strukturfüllung |
| TH-V05 | Q-Rille 2,0 mm Q-Rille 2,0 mm | 0,35 - 0,45 | Strukturüberströmung Teil-Strukturfüllung |
| TH-V06 | Q-Rille 2,0 mm Q-Rille 2,0 mm | 0,60 - 0,70 | Strukturüberströmung Teil-Strukturfüllung |
| TH-V07 | glatt Q-Rille 4,0 mm | 0,15 - 0,20 | - Strukturfüllung |
| TH-V08 | glatt Q-Rille 4,0 mm | 0,35 - 0,45 | - Strukturfüllung |
| TH-V09 | glatt Q-Rille 4,0 mm | 0,60 - 0,70 | - Strukturfüllung |
| TH-V07 | Q-Rille 4,0 mm Q-Rille 2,0 mm | 0,15 - 0,20 | Strukturüberströmung Strukturüberströmung |
| TH-V08 | Q-Rille 4,0 mm Q-Rille 2,0 mm | 0,35 - 0,45 | Teil-Strukturfüllung Teil-Strukturfüllung |
| TH-V09 | Q-Rille 4,0 mm Q-Rille 2,0 mm | 0,60 - 0,70 | - Strukturfüllung Strukturfüllung |

In Bild 6.7 ist die Thermographieaufnahme vom Fließ- und Formfüllvorgang in der Kavität mit der Oberflächenstruktur *Q-Rille 1,0 mm* dargestellt. Eine Momentaufnahme entspricht ca. 0,2 s.

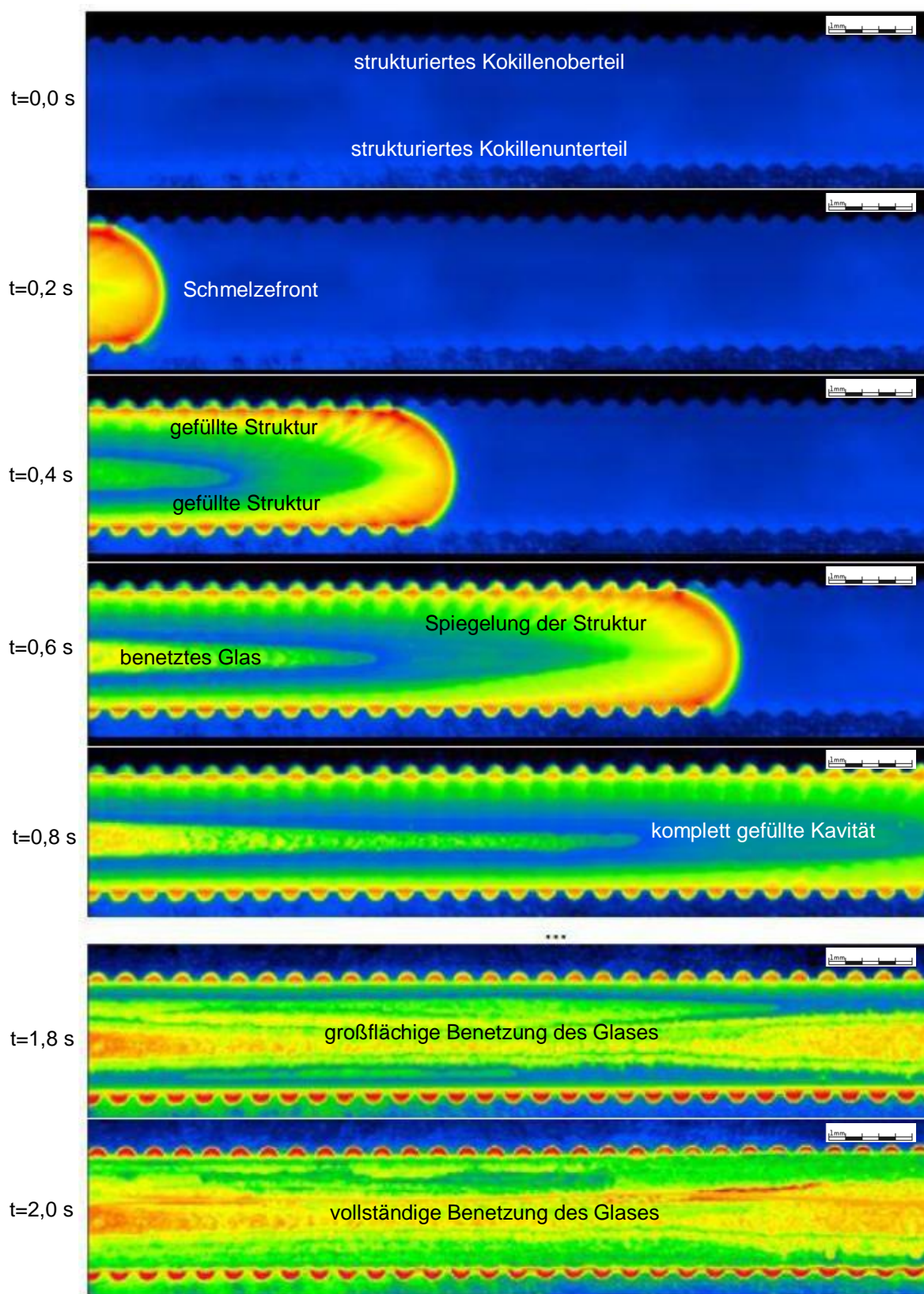


Bild 6.7: Thermographieaufnahme (TH-V01) mit der Struktur *Q-Rille 1,0 mm* oben und unten

Die Strömungsgeschwindigkeit bei dieser Versuchskonfiguration betrug ca. 0,15 m/s bis 0,2 m/s. In einem zeitlichen Abstand von 0,2 s erkennt man, wie die Schmelze von links nach rechts strömte und die Kavität füllte. Aufgrund der Oberflächenspannung des Aluminiums bildete sich die Schmelzefront halbkreisförmig aus ($t=0,2$ s). Die Grenze zwischen Schmelzefront und noch ungefüllten Kavität konnte anhand des hellgrünen Halbkreises gezogen werden. Während des Gießvorganges benetzte die Schmelze das Saphirglas in einem schmalen Bereich (ca. 2,0 mm) und eine dünne erstarrte Rand-schicht bildete sich aus (hellgrüner Bereich, $t=0,4$ s). Die voranschreitende Erstarrung erhöhte die Emissivität stetig, wodurch dieser Bereich zeitabhängig in einen Orangeton überging ($t=0,6$ s). Die Aufnahmen vermittelten den Eindruck, dass die Struktur *Q-Rille 1,0 mm* oben und unten direkt gefüllt wurde ($t=0,8$ s). Durch die farbliche Änderung in den Strukturvertiefungen von Orange zu Rot konnte geschlussfolgert werden, dass nach der Füllung der Strukturen die Erstarrung der Schmelze einsetzte (Erhöhung der Emissivität). Durch das Abfrieren der Schmelzefront resultierte ein Druckanstieg in der Kavität, wodurch die Schmelze die Saphirscheibe vollständig benetzte ($t=2,0$ s).

In Bild 6.8 ist die Thermographieaufnahme vom Fließ- und Formfüllvorgang in der Kavität mit der Oberflächenstruktur *Q-Rille 2,0 mm* dargestellt. Wie bei der *Q-Rille 1,0 mm* betrug hier die Strömungsgeschwindigkeit ca. 0,15 m/s bis 0,2 m/s. Die Schmelzefront war ebenfalls durch eine Halbkreisform gekennzeichnet. Anhand der Strukturgröße von 2,0 mm war es möglich, eine deutlichere Grenze zwischen der Schmelze und der noch ungefüllten Kavität bzw. den Oberflächenstrukturen zu identifizieren. Die Abgrenzung konnte anhand der rotgrünen Zone definiert werden. Die teilweise Überströmung der Oberflächenstrukturen wurde durch die Oberflächenspannung des flüssigen Aluminiums ermöglicht ($t=0,4$ s). Der rote quadratische Ausschnitt in der vierten Momentaufnahme ($t=0,6$ s) ist in Bild 6.9 nochmals vergrößert dargestellt. Zu erkennen sind hier die mögliche Schmelzefront und deren Abgrenzung sowie ein mögliches Luftvolumen durch die strukturierte Kokillenoberfläche. Das Luftvolumen und dessen grüne Farbgebung könnte das Resultat des geometrisch bedingten Selbstschwärzungseffektes [162; 166] sein. Dies tritt in Bohrungen und Vertiefungen auf, wenn die Wärmestrahlung mehrfach reflektiert und zurückgeworfen wird. Die Folge ist eine erhöhte Emissivität.

Die Thermographieaufnahmen verdeutlichten, dass die Oberflächenstruktur *Q-Rille 2,0 mm* beim Formfüllvorgang oben und unten teilweise überströmt wurde. In der Analogie zur Formfüllung der *Q-Rille 1,0 mm* wurde die eingesetzte Saphirscheibe durch die Schmelze zunehmend benetzt ($t=1,8$ s). Durch die Erstarrung im Randbereich und dem Anstieg der Emissivität erfolgte ein Farbwechsel von Grün zu Rot. Am Ende der Formfüllung ($t=2,0$ s) wurden die Strukturen durch den resultierenden metallostatistischen Druck komplett gefüllt.

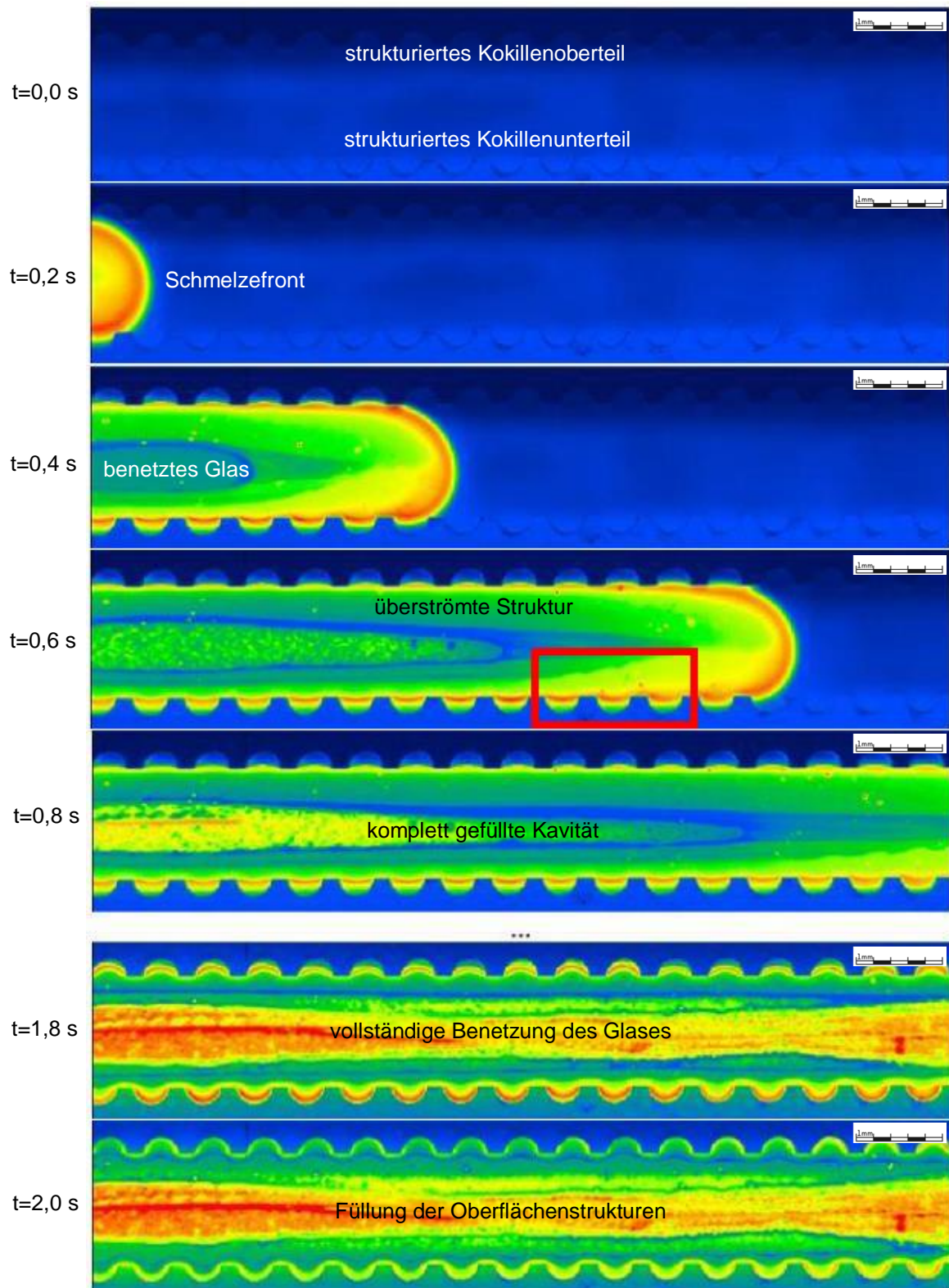


Bild 6.8: Thermographieaufnahme (TH-V04) mit der Struktur *Q-Rille 2,0 mm* oben und unten

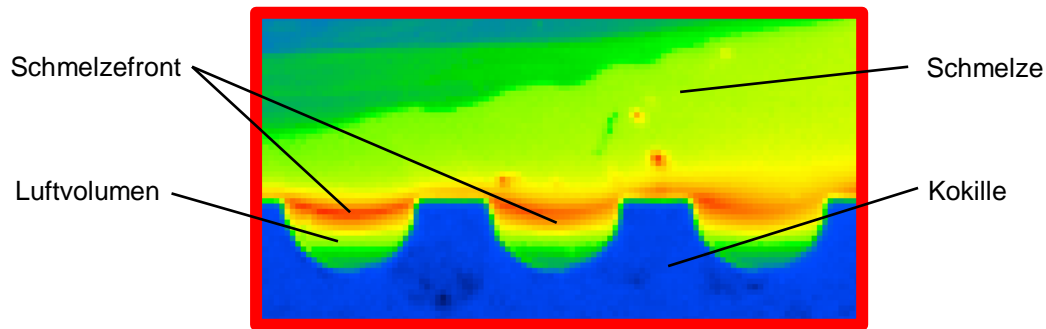


Bild 6.9: Detailansicht der überströmten Struktur *Q-Rille 2,0 mm* während der Formfüllung

In Bild 6.10 ist die Thermographieaufnahme (TH-V07) vom Fließ- und Formfüllvorgang in der Kavität mit der Oberflächenstruktur *Q-Rille 4,0 mm* zu sehen. Bei dieser Versuchskonfiguration war nur die untere Modulplatte strukturiert. Die Strömungsgeschwindigkeit betrug ca. 0,15 m/s bis 0,2 m/s. Während der Formfüllung konnte beobachtet werden, dass die Schmelze die Oberflächenstruktur direkt füllte ($t=0,4$ s). Die Ausbildung eines wärmeisolierenden Luftvolumens konnte nicht beobachtet werden. Jedoch wurden die Oberflächenstrukturen nicht 100 %ig abgebildet und wiesen leichte Kantenverrundungen auf. Durch die Krümmung der Schmelzefront in den Strukturvertiefungen ergab sich eine Änderung des Betrachtungswinkels, wodurch sich die Emissivität winkelabhängig veränderte. Dies konnte anhand der roten Bereiche in den Strukturvertiefungen erkannt werden. Der Abstand von 4,0 mm zwischen den Strukturerrhöhungen konnte wegen der zu geringen Oberflächenspannung des flüssigen Aluminiums nicht mehr überbrückt werden. Auch durch eine deutliche Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit auf ca. 0,6 m/s bis 0,7 m/s konnte keine Überströmung der Oberflächenstruktur *Q-Rille 4,0 mm* erzielt werden. Mit steigender Strömungsgeschwindigkeit bildeten sich hingegen Verwirbelungen in den Strukturvertiefungen aus. Am Ende der Formfüllung erfolgte durch den metallostatischen Druck eine Verbesserung des Strukturabbildungsvermögens. Dies war durch eine farbliche Änderung der Schmelze von Rot zu Grün gekennzeichnet.

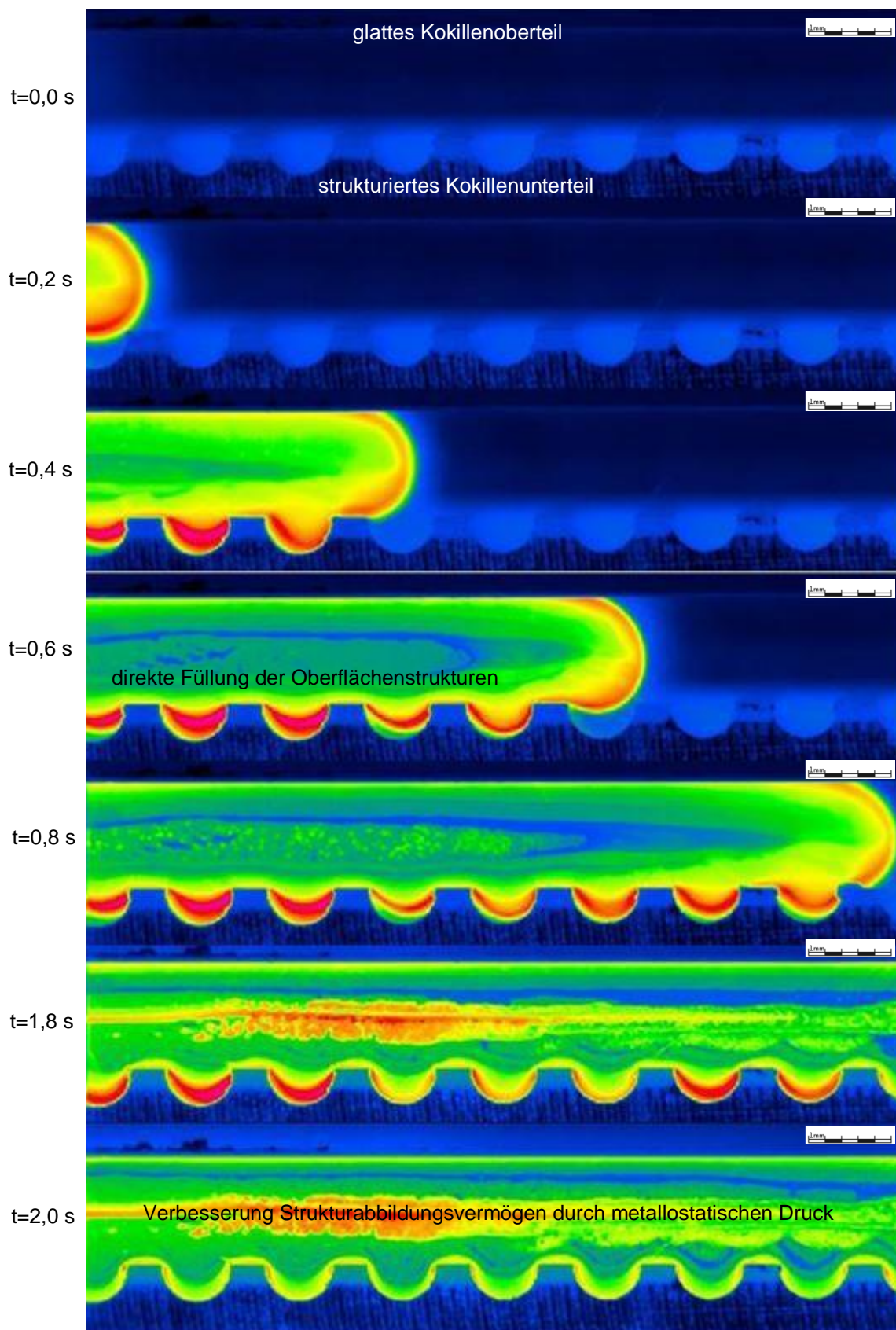


Bild 6.10: Thermographieaufnahme (TH-V07) mit der Struktur Q-Rille 4,0 mm unten

6.1.2.2 Hochgeschwindigkeitsaufnahmen

Aufgrund der Messproblematik und der schwierig zu interpretierenden Ergebnisse der Thermografieaufnahmen wurden ergänzend Hochgeschwindigkeitsaufnahmen durchgeführt. Der Versuchsaufbau blieb für diese Versuchsreihe unverändert. Die Saphirgläser im Metallrahmen wurden durch thermoschockbeständige Gläser (NEXTREMA) der Fa. SCHOTT ersetzt. Das Datenblatt kann Anhang M entnommen werden [167].

Zur Dokumentation des Formfüllvorganges wurde die Hochgeschwindigkeitskamera FastCam SA1.1 mit einem CMOS-Sensor der Fa. Photron verwendet. Dieser Sensortyp ermöglichte eine schnelle Signalverarbeitung mit hohen Bildraten und eignete sich gut bei den vorliegenden, schwierigen Lichtverhältnissen. Die maximal mögliche Auflösung des CMOS-Sensors beträgt 1.024 x 1.024 Pixel oder ermöglicht bis zu 675.000 Bilder pro Sekunde [168–170]. Zur Dokumentation des Formfüllvorganges in der Kavität wurden eine Auflösung von 1.024 x 512 Pixeln und 8.000 Bilder pro Sekunde gewählt. Der Abstand der Hochgeschwindigkeitskamera zur Bezugsebene betrug 50 cm. Es wurden Aufnahmen mit den zwei Objektiven Nikon 24 - 85 mm 1:2, 8 - 4D und Navitar Distanzmakroobjektiv 0,58 - 12 mit einer Festbrennweite von 100 mm durchgeführt. Die Ausleuchtung der Kavität erfolgte durch eine leistungsstarke Metalldampflampe mit 10.000 Lux (2.000 W HMI Lampe). Die Beleuchtung erfolgte entweder mittels Frontallicht oder im Gegenlicht.

Der Versuchsaufbau für die Aufnahmen mit Frontallicht ist in Bild 6.11 dargestellt. Man erkennt die angeleuchtete modulare Kokille mit geöffneter Kavität, den Metallrahmen und die Hochgeschwindigkeitskamera. Mit dieser Versuchskonfiguration wurden die Oberflächen *glatt*, *Q-Rille 1,0 mm*, *Q-Rille 2,0 mm* und *Q-Rille 4,0 mm* analysiert.

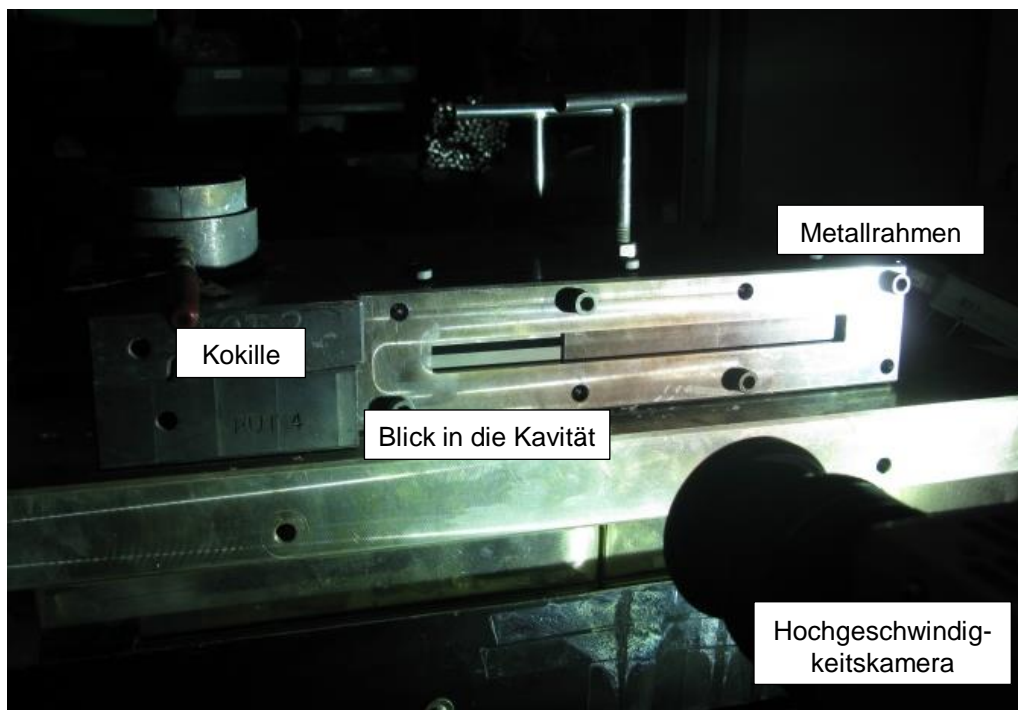


Bild 6.11: Versuchsaufbau für die Hochgeschwindigkeitsaufnahmen mit Frontallicht

Tabelle 6.2 stellt eine Übersicht der Versuchskonfigurationen der durchgeführten Hochgeschwindigkeitsaufnahmen sowie das Ergebnis während der Formfüllung dar.

Tabelle 6.2: Übersicht der Versuchskonfigurationen der Hochgeschwindigkeitsaufnahmen

| Versuchsnummer Hochgeschwindigkeits- aufnahmen | Struktur oben Struktur unten | Strömungs- geschwindigkeit [m/s] | Ergebnis während der Formfüllung |
|--|--|-------------------------------------|--|
| HS-V01 | <i>glatt</i> <i>glatt</i> | 0,05 - 0,10 | - - |
| HS-V02 | <i>glatt</i> <i>glatt</i> | 0,25 - 0,30 | - - |
| HS-V03 | <i>glatt</i> <i>glatt</i> | 0,55 - 0,65 | - - |
| HS-V04 | <i>Q-Rille 1,0 mm</i> <i>Q-Rille 1,0 mm</i> | 0,05 - 0,10 | Strukturüberströmung Strukturüberströmung |
| HS-V05 | <i>Q-Rille 1,0 mm</i> <i>Q-Rille 1,0 mm</i> | 0,25 - 0,30 | Strukturüberströmung Strukturüberströmung |
| HS-V06 | <i>Q-Rille 1,0 mm</i> <i>Q-Rille 1,0 mm</i> | 0,55 - 0,65 | Strukturüberströmung Strukturüberströmung |
| HS-V07 | <i>Q-Rille 2,0 mm</i> <i>Q-Rille 2,0 mm</i> | 0,05 - 0,10 | Strukturüberströmung Strukturüberströmung |
| HS-V08 | <i>Q-Rille 2,0 mm</i> <i>Q-Rille 2,0 mm</i> | 0,25 - 0,30 | Strukturüberströmung Strukturüberströmung |
| HS-V09 | <i>Q-Rille 2,0 mm</i> <i>Q-Rille 2,0 mm</i> | 0,55 - 0,65 | Strukturüberströmung Strukturüberströmung |

Bild 6.12 zeigt den Fließ- und Formfüllvorgang mit Frontallicht bei einer glatten Oberfläche oben und unten. Der Versuchsaufbau ermöglichte eine sehr gute Ausleuchtung der Schmelzeoberfläche. Die Strömungsgeschwindigkeit betrug ca. 0,1 m/s. In dem zeitlich dargestellten Abstand von 0,1 s strömte die Schmelze von links nach rechts in die Kavität ein. Deutlich zu erkennen war die halbkreisförmige Oberflächenkrümmung des flüssigen Aluminiums durch die Oberflächenspannung ($t=0,3$ s). Während des Gießvorganges benetzte die Schmelze das Glas in einem schmalen Bereich. Man erkannte das Einsetzen der Kristallisation und der Erstarrung ($t=0,4$ s). Nach weniger als einer Sekunde kam die Formfüllung mit der glatten Oberfläche zum Erliegen. Die Fließlänge betrug ca. 80 mm ($t=0,6$ s).

Bei Gießversuchen mit höheren Strömungsgeschwindigkeiten konnte die Fließlänge gesteigert werden. Bei Strömungsgeschwindigkeiten von bis zu 0,6 m/s traten keine sichtbaren Oberflächenturbulenzen auf. Dieser Effekt wurde aufgrund der Kanalgeometrie, der Oberflächenspannung und der sich bildenden Oxidhaut unterdrückt. Das häufig in der Literatur beschriebene „Aufreißen“ der Oxidhaut konnte bei 8.000 Bildern pro Sekunde nicht dokumentiert werden. Bild 6.13 stellt eine Detailansicht des rot markierten Bereiches von Bild 6.12 dar und zeigt vermutlich eine sich stetig neu bildende

Oxidhaut. Resultat ist das Linienmuster quer zur Strömungsrichtung auf der Oberfläche der Schmelze. Diese Thematik wird in Kapitel 6.3 nochmals aufgegriffen.

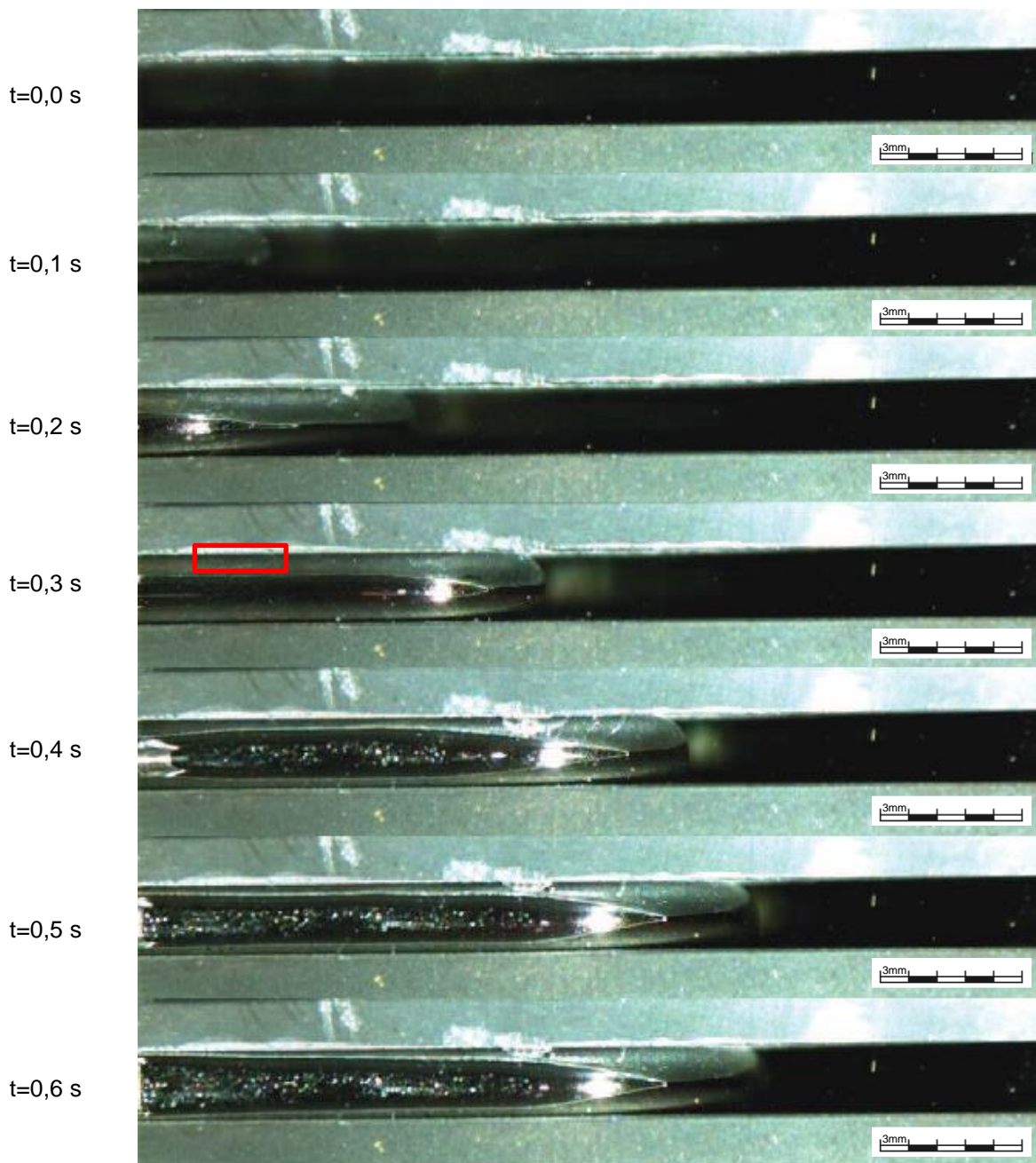


Bild 6.12: Hochgeschwindigkeitsaufnahme (HS-V01) mit einer glatten Oberfläche



Bild 6.13: Detailansicht HS-V01 mit glatter Oberfläche und möglicher Oxidhaut (Linienmuster)

Die Aufnahmen im Frontallicht boten die Möglichkeit die Schmelzefront während des Formfüllvorganges zu dokumentieren. Hierdurch wurden Details auf der Schmelzeoberfläche und die Strömungscharakteristik sichtbar. Nachteilig war jedoch die begrenzte Ausleuchtung der innenliegenden Kavität. Die durchgeführten Aufnahmen mit den Oberflächenstrukturen *Q-Rille 1,0 mm*, *Q-Rille 2,0 mm* und *Q-Rille 4,0 mm* brachten im Frontallicht keinen Erkenntnisgewinn, da eine zielgerichtete Ausleuchtung der Strukturen nicht realisiert werden konnte, vgl. [171]. Aus diesem Grund wird an dieser Stelle auf eine weiterführende Analyse verzichtet.

Zur Ausleuchtung der Oberflächenstrukturen *Q-Rille 1,0 mm*, *Q-Rille 2,0 mm* und *Q-Rille 4,0 mm* wurden nachfolgend Aufnahmen im Gegenlicht durchgeführt. Der verwendete Versuchsaufbau ist in Bild 6.14 dargestellt. Im Gegenlicht erschienen die Kokille und die spätere Schmelzeoberfläche schwarz. Im Hintergrund erkennt man das Licht der Metaldampflampe und die durchleuchtete Oberflächenstruktur. Durch das Gegenlicht konnten zielführend der Füllzeitpunkt und die Füllcharakteristik der Oberflächenstrukturen dokumentiert werden.

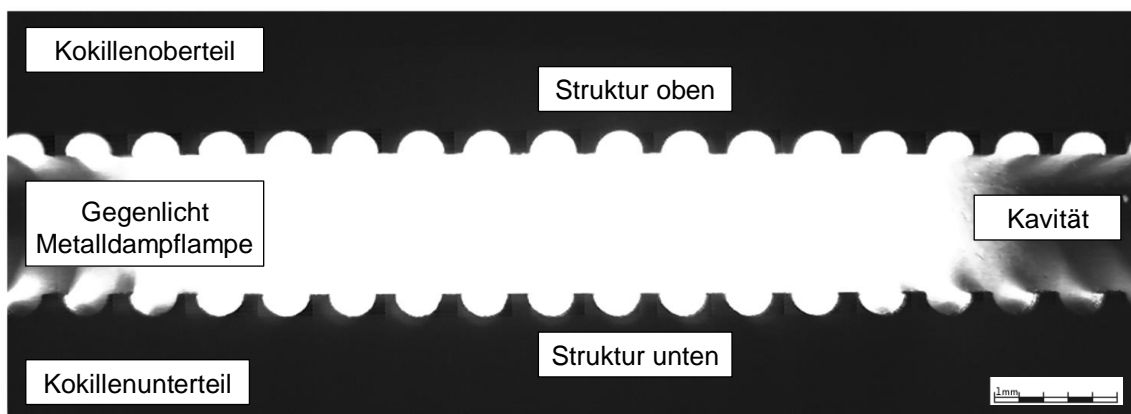


Bild 6.14: Versuchsaufbau für Hochgeschwindigkeitsaufnahmen im Gegenlicht mit Blick in die Kavität

Bild 6.15 zeigt den Fließ- und Formfüllvorgang im Gegenlicht mit der Oberflächenstruktur *Q-Rille 1,0 mm*. Die Strömungsgeschwindigkeit der Schmelze betrug ca. 0,1 m/s. Im Gegenlicht erschienen die betrachtete Oberfläche und die lichtundurchlässige Schmelze schwarz. Die Schmelze strömte von links nach rechts und überströmte die Querrillen der Oberflächenstrukturen oben und unten. In den Strukturvertiefungen verblieb Luft, erkennbar an den halbkreisförmigen Lichtkegeln. Nach ca. einer Sekunde erstarrte die Schmelzefront. Aufgrund des verwendeten Gießsystems mit Eingießtrichter resultierte ein Druckanstieg in der Kavität. Dieser führte dazu, dass die oberen und unteren Oberflächenstrukturen mit Schmelze gefüllt wurden. Dies war erkennbar an dem Verschwinden der halbkreisförmigen Lichtkegel. Der Druckanstieg verbesserte somit das Strukturabbildungsvermögen. Dieser Effekt wurde bereits bei den Thermographieaufnahmen vermutet, war jedoch bei dieser Versuchsmethodik deutlich aussagekräftiger. Übereinstimmende Fließ- und Füllcharakteristika konnten auch bei weiteren Gießversuchen mit höheren Strömungsgeschwindigkeiten von bis zu 0,6 m/s nachgewiesen werden.

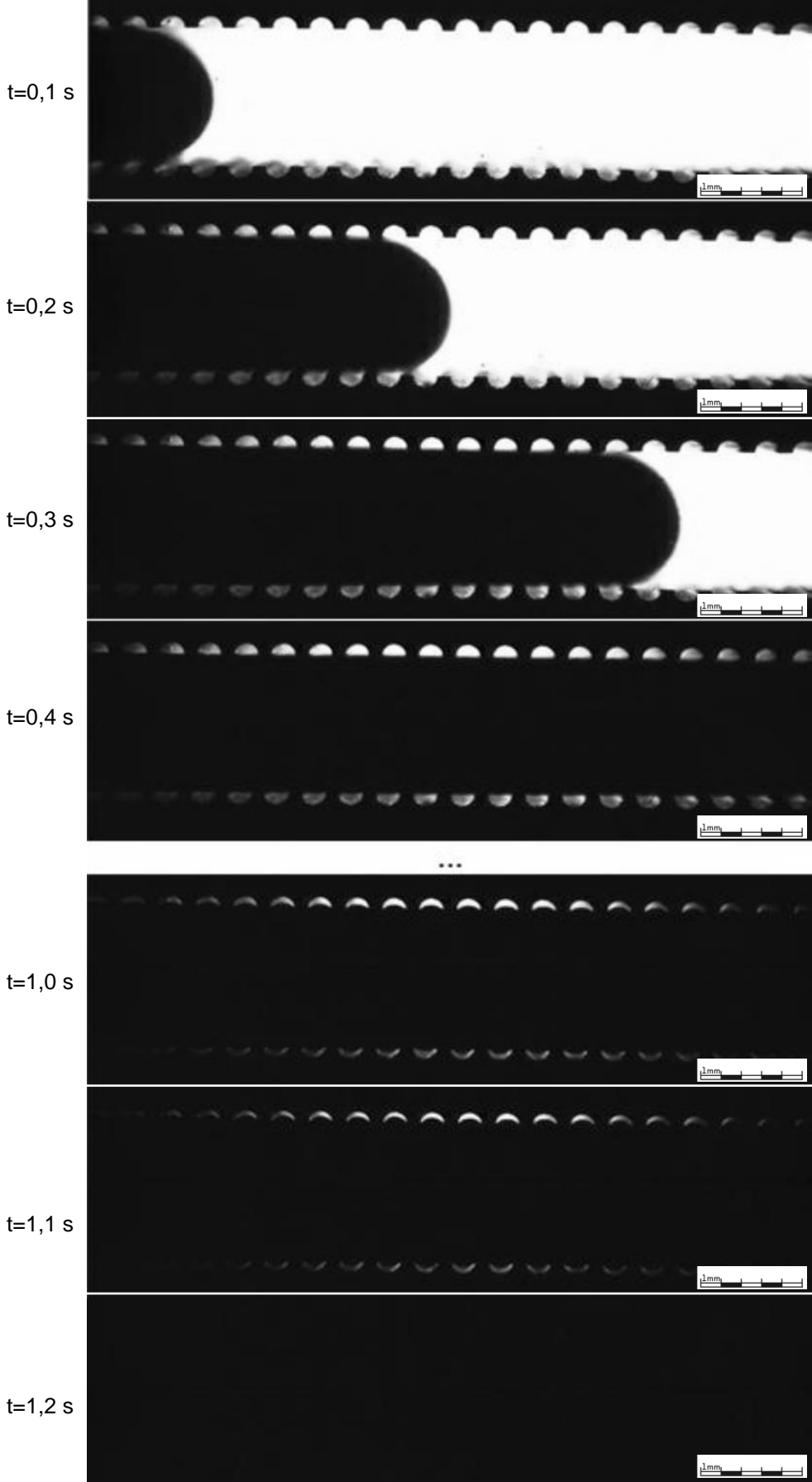


Bild 6.15: Hochgeschwindigkeitsaufnahme (HS-V4) mit Q-Rille 1,0 mm

Im Bild 6.16 ist der Fließ- und Formfüllvorgang mit der Oberflächenstruktur *Q-Rille 2,0 mm* dargestellt.

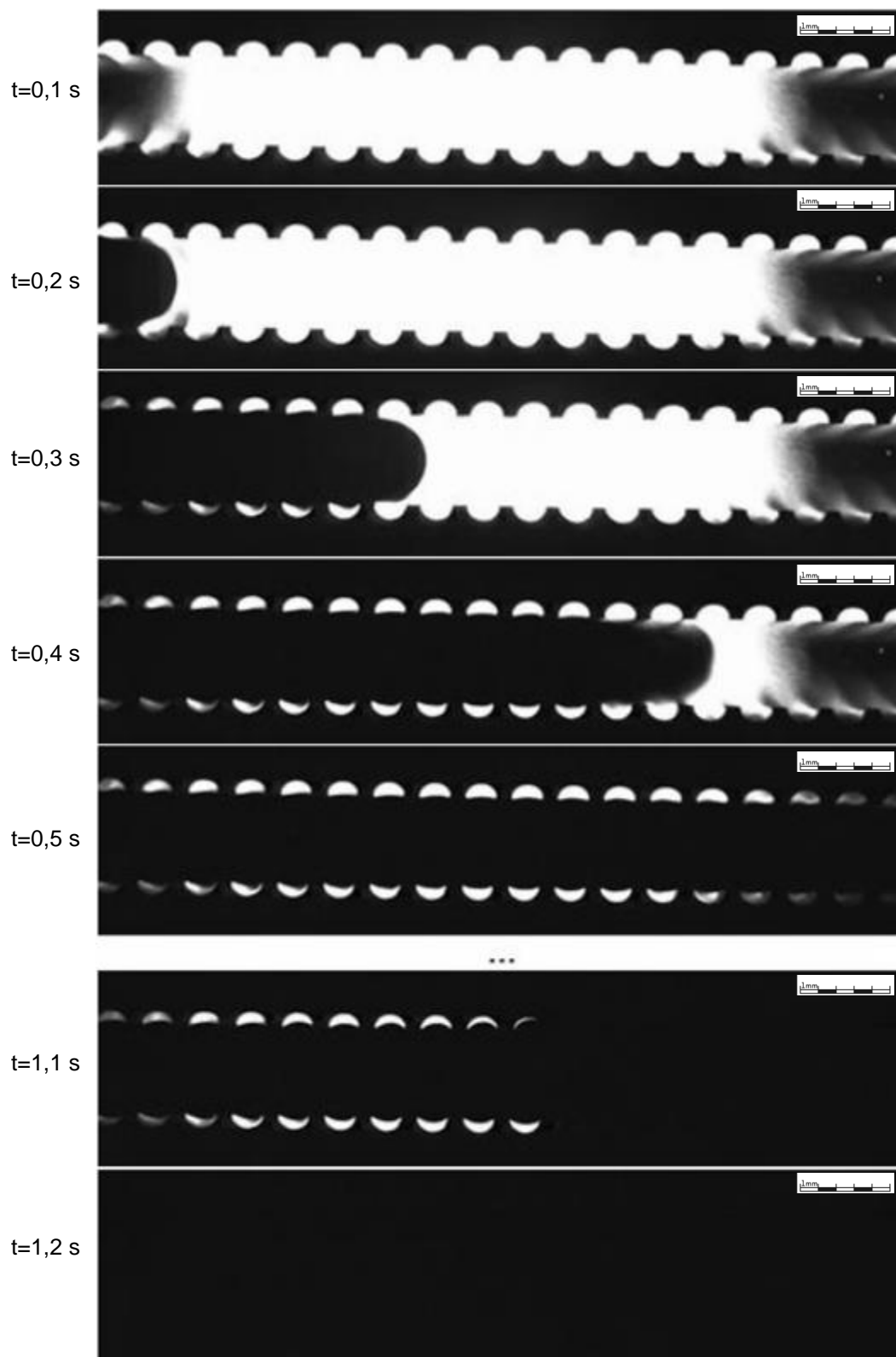


Bild 6.16: Hochgeschwindigkeitsaufnahme (HS-V07) mit *Q-Rille 2,0 mm*

Die Strömungsgeschwindigkeit der Schmelze betrug bei dieser Aufnahme ca. 0,1 m/s. Die 2,0 mm breite Struktur wurde während der Formfüllung oben und unten überströmt. Auch hier bildete sich in den Vertiefungen ein Luftvolumen aus ($t=0,3$ s). Nach ca. 1,0 s wurde das Ende der Formfüllung erreicht. Hierdurch erfolgte ein Druckanstieg in der Kavität, wodurch sich eine zurücklaufende Welle ausbildete ($t=1,1$ s). Die Schmelze wurde in die Strukturvertiefungen gedrückt und das Luftvolumen verdrängt. Eine Vermessung der Gussteile ergab ein Strukturabbildungsvermögen von nahezu 100 %. Auch bei den Gießversuchen mit Strömungsgeschwindigkeiten von bis zu 0,6 m/s zeigten sich die Effekte des Überströmens der Oberflächenstrukturen, die Bildung eines Luftvolumens in den Strukturvertiefungen und die anschließende Füllung der Oberflächenstruktur.

6.1.2.3 Reduzierung des metallostatischen Druckes

Anhand der durchgeführten Thermographie- und Hochgeschwindigkeitsaufnahmen wurde festgestellt, dass das Strukturabbildungsvermögen durch die Schmelze der drei untersuchten *Q-Rillen*-Strukturen von deren geometrischen Abmessungen und dem wirkenden metallostatischen Druck am Ende der Formfüllung abhängig war. Um die gewonnenen Untersuchungsergebnisse auf die verbleibenden 19 Oberflächenstrukturen auszuweiten, wurden Gießversuche mit reduziertem metallostatischen Druck durchgeführt. Ziel war die Darstellung und die anschließende Vermessung des Strukturabbildungsvermögens während der Formfüllung. Die Untersuchungsmethodik ist schematisch in Bild 6.17 dargestellt.

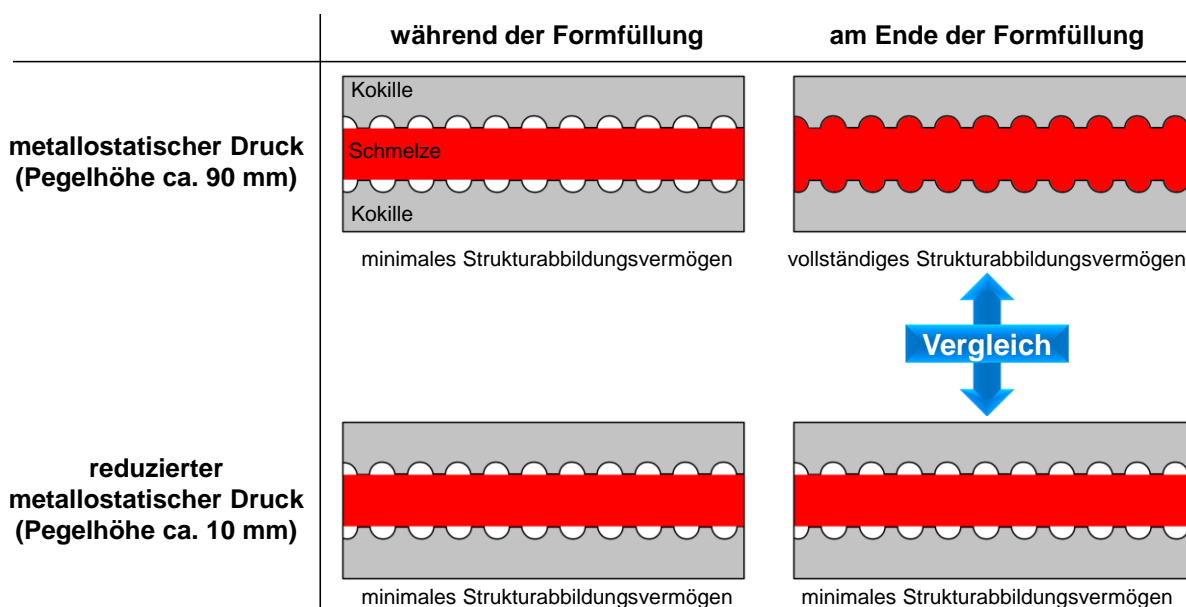


Bild 6.17: Verdeutlichung des Untersuchungsziels mit reduziertem metallostatischen Druck

Die Reduzierung des metallostatischen Druckes am Ende der Formfüllung wurde durch eine Absenkung des Schmelzepegels von 90 mm (mit metallischem Eingießtrichter) auf 10 mm (ohne metallischen Eingießtrichter) erreicht. Hierdurch wurde der metallostatische Druck von ca. 2.100 Pa auf ca.

240 Pa reduziert. Nach den durchgeführten Abgüssen erfolgte die Ermittlung der maximalen Gussteilwandstärke an definierten Messpunkten, vgl. Bild 5.6. Zur Gegenüberstellung wurden die ermittelten Gussteilwandstärken, wie in Bild 5.7 dargestellt, herangezogen. Die maximale Wandstärke war somit ein Maß für das Strukturabbildungsvermögen durch die Schmelze.

In Bild 6.18 sind zwei Gussteilausschnitte dargestellt, welche die inverse Struktur *Haifisch grob* aufweisen. Auf dem linken Bild erkennt man, dass durch den reduzierten metallostatistischen Druck (ca. 240 Pa) die Struktur nicht zu 100 % abgebildet wurde. Die Kontaktfläche zwischen Gussteil und Kokille ist blau hervorgehoben. Rechts sieht man, dass durch den metallostatistischen Druck von ca. 2.100 Pa die Oberflächenstruktur zu 100 % abgebildet wurde, wodurch sich am Ende der Formfüllung die komplette Kokillenoberfläche im Kontakt mit der Schmelze befand. Die Messergebnisse der Stitching-Aufnahmen mit einem Keyence VHX-5000 Digitalmikroskop sind in Anhang N zu finden.

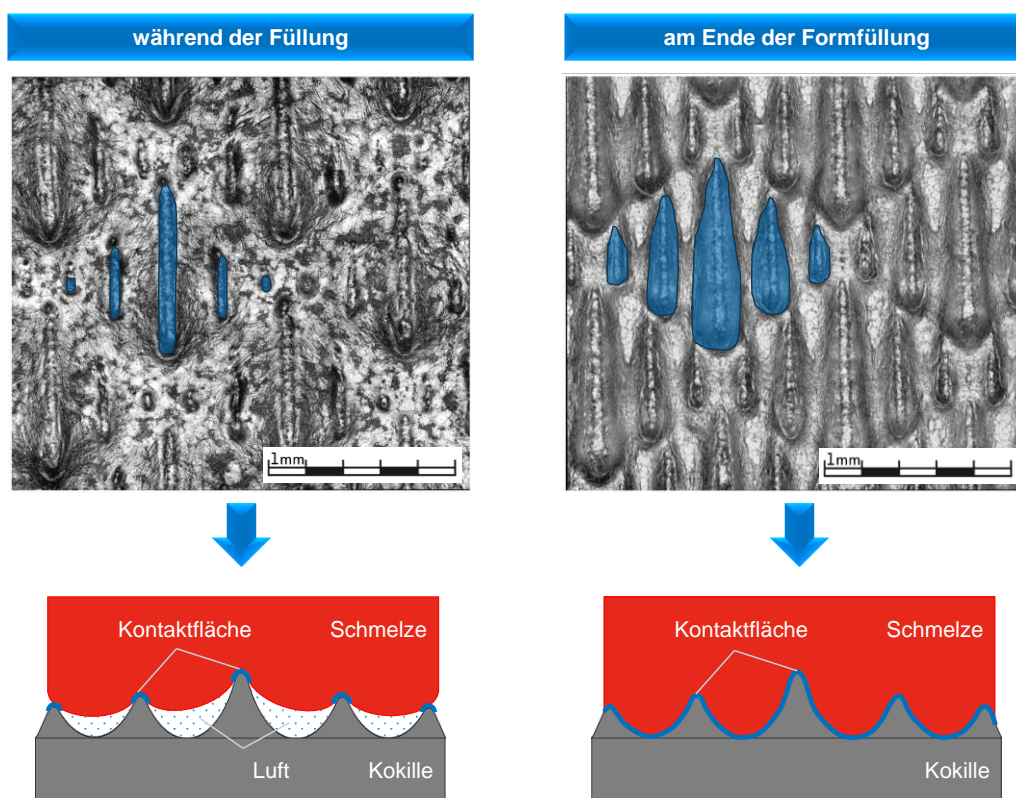


Bild 6.18: Reales und schematisches Strukturabbildungsvermögens der Struktur *Haifisch grob*

Nachfolgend werden ausgewählte Ergebnisse dieser Versuchsreihe diskutiert. In den acht Diagrammen sind die maximal ermittelten, strukturabhängigen Gussteilwandstärken über der Fließlänge zu sehen. Hierzu wurden pro Oberflächenstruktur mindestens drei Gussteile hergestellt und der Mittelwert der Gussteilwandstärken gebildet. Die dunkelgrauen Messpunkte verdeutlichen die gemessenen Wandstärken bei einem metallostatistischen Druck von ca. 2.100 Pa und die hellgrauen Messpunkte die ermittelten Wandstärken bei einem reduzierten metallostatistischen Druck von ca. 240 Pa. Die blaue Linie kennzeichnet die maximal mögliche Gussteilwandstärke bei einem 100 %igen Strukturabbildungsvermögen durch die Schmelze.

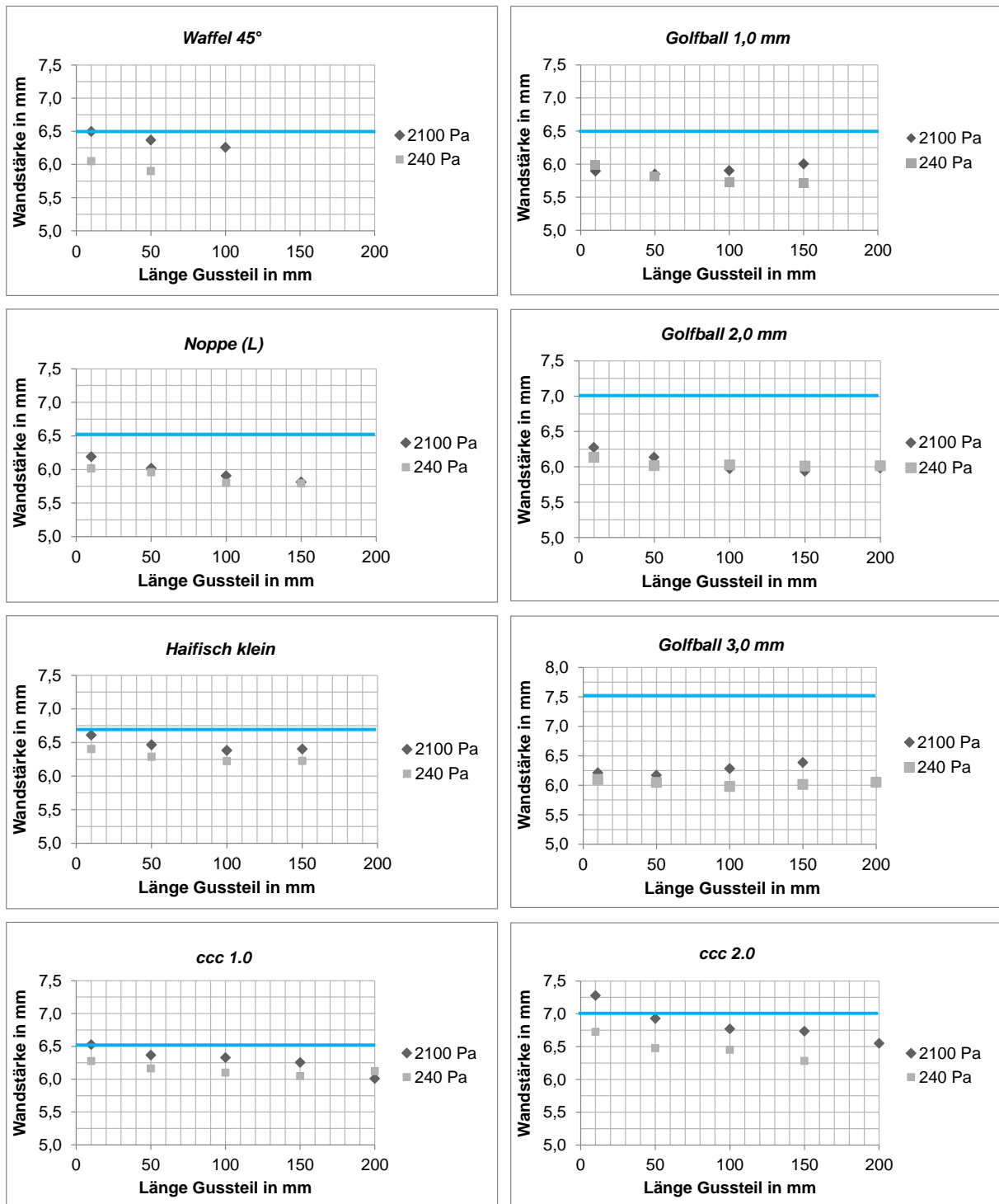


Bild 6.19: Ermittelte Gussteilwandstärken in Abhängigkeit vom metallostatischen Druck

Wie den acht dargestellten Diagrammen in Bild 6.19 zu entnehmen ist, war die maximale Gussteilwandstärke abhängig vom metallostatischen Druck am Ende der Formfüllung. So zeigte sich bei der Struktur *Waffel 45°* eine Differenz der maximalen Gussteilwandstärke von bis zu 0,5 mm. Bei einem metallostatischen Druck von 2.100 Pa wurde die Struktur durch die Schmelze fast vollständig abgebildet. Es kann geschlossen werden, dass während des Formfüllvorganges die Oberflächenstruktur überströmt wurde.

Der gleiche Effekt konnte bei den Strukturen *ccc 1.0* und *ccc 2.0* beobachtet werden. Das Strukturabbildungsvermögen betrug bei ca. 240 Pa rund 40 % bzw. 50 %. Bei einem metallostatistischen Druck von ca. 2.100 Pa am Ende der Formfüllung wurde dieses auf jeweils ca. 80 % gesteigert.

Die drei Golfballstrukturen zeigten bei einem metallostatistischen Druck von 240 Pa und 2.100 Pa ein Strukturabbildungsvermögen von weniger als 10 %, da das Luftvolumen am Ende der Formfüllung nicht aus den Strukturvertiefungen verdrängt werden konnte. Die Golfball-Strukturen weisen ein geschlossenes Strukturnetzwerk auf, wodurch beim Überströmen keine Entlüftungsmöglichkeit gegeben war. Das eingeschlossene Luftvolumen in den Strukturvertiefungen blieb bei der Formfüllung und bei der Erstarrung vollständig erhalten.

Die Struktur *Noppe (L)* besitzt sehr viele, feine Strukturerhebungen mit einem Abstand von 0,2 mm. Bei den untersuchten, metallostatistischen Drücken von 240 Pa und 2.100 Pa konnte die Schmelze nicht eindringen. Es resultierte ein wärmeisolierender Luftspalt während der Formfüllung und der Erstarrung. Die Wandstärkenzunahme war bei beiden Versuchsreihen vernachlässigbar klein ($< 0,1$ mm).

Bei den Strukturen *Haifisch klein* und *Haifisch grob* ergaben sich druckabhängige Gussteilwandstärken. Die Differenz lag im Bereich von ca. 0,2 mm. Durch das große Aspektverhältnis von Tiefe zu Breite der Oberflächenstruktur resultierte eine Stützwirkung für die Schmelze. Es ist davon auszugehen, dass ein Luftspalt von ca. 0,2 mm bis 0,3 mm zwischen der Schmelze und der Kokille entstand. Die Haifisch-Strukturen weisen ebenfalls ein durchgängiges Strukturnetzwerk auf. Durch die Erhöhung des metallostatistischen Druckes entwich die Luft aus den Strukturvertiefungen. Das Resultat am Ende der Formfüllung war ein hohes Strukturabbildungsvermögen von ca. 80 %, vgl. Bild 6.18.

Die hier beschriebenen Erkenntnisse wurden bei allen 26 untersuchten Oberflächenstrukturen nachgewiesen und können dem Anhang O entnommen werden. Einzig die Struktur *Q-Rille 4,0 mm* wurde bereits während der Formfüllung gefüllt. Der Strukturdurchmesser von 4,0 mm konnte von der Schmelze nicht überbrückt werden. Es resultierte ein Strukturabbildungsvermögen von 100 %.

Bei den durchgeführten Untersuchungen mit einem reduzierten metallostatistischen Druck am Ende der Formfüllung wurde erkannt, dass es strukturbedingt zur Bildung von Luftspalten in den Strukturvertiefungen kommt. Erstarrt die Schmelzefront bzw. ist die Kavität gefüllt, erhöht sich das Strukturabbildungsvermögen in Abhängigkeit von metallostatistischen Druck. Diese Feststellungen deckten sich mit den Erkenntnissen aus den Thermographie- und Hochgeschwindigkeitsaufnahmen.

6.1.3 Zusammenfassung

Die durchgeführten Untersuchungen mittels Thermographie- und Hochgeschwindigkeitsaufnahmen sowie die Gießversuche mit reduziertem metallostatistischen Druck haben gezeigt, dass die Oberflächenstrukturen mit einer Strukturbreite von bis zu 3,0 mm überströmt werden konnten. Die Füllung der Strukturen in Abhängigkeit vom metallostatistischen Druck am Ende der Formfüllung konnte sowohl numerisch als auch experimentell mit einer sehr hohen Übereinstimmungsquote nachgewiesen werden. Aus den Untersuchungen lassen sich strukturabhängig drei Phasen während des Formfüllvorganges ableiten: Randschichtbildung und Wiederaufschmelzen, Luftspaltbildung und Füllung der Struk-

tur. Tabelle 6.3 stellt zusammengefasst die drei Phasen für die 26 Oberflächenstrukturen aus den numerischen und experimentellen Untersuchungen dar.

Tabelle 6.3: Die drei Phasen während des strukturabhängigen Formfüllvorganges

| Struktur | Phase I Wideraufschmelzen | Phase II Luftspaltbildung | Phase III Füllung der Struktur |
|---|--------------------------------------|--------------------------------------|---|
| <i>glatt</i> | nein | nein | - |
| <i>Waffel 45° Waffel 0° Waffel fein</i> | nein | gering | Teil-Strukturfüllung |
| <i>Golfball 1,0 mm</i> | nein | ja | keine Strukturfüllung |
| <i>Golfball 2,0 mm Golfball 3,0 mm</i> | ja | ja | keine Strukturfüllung |
| <i>ccc 1.0 ccc 2.0</i> | ja | gering | Teil-Strukturfüllung |
| <i>Q-Rille 1,0 mm Q-Rille 2,0 mm</i> | nein | ja | Teil-Strukturfüllung |
| <i>Q-Rille 4,0 mm</i> | nein | nein | Strukturfüllung |
| <i>L-Rille (L) 1,5 mm L-Rille (L) 2,0 mm</i> | ja | ja | Teil-Strukturfüllung |
| <i>Noppe (L) Raute (L)</i> | ja | ja | keine Strukturfüllung |
| <i>Haifisch klein Haifisch grob Haifisch grob 90°</i> | ja | gering | Teil-Strukturfüllung |
| <i>Laser diffus</i> | ja | ja | - |
| <i>L-Rille 0,5 mm</i> | nein | ja | keine Strukturfüllung |
| <i>L-Rille 1,0 mm L-Rille 1,5 mm</i> | ja | ja | keine Strukturfüllung |
| <i>L-Rille 2,0 mm</i> | ja | ja | Teil-Strukturfüllung |
| <i>Carbon</i> | ja | ja | keine Strukturfüllung |
| <i>Eagle Eye</i> | ja | ja | Teil-Strukturfüllung |

Randschichtbildung und Wideraufschmelzen

Beim Kontakt mit der Kokillenoberfläche bildet sich stets eine dünne, erstarrte Randschicht, welche eine Stützfunktion ausübt und das Eindringen der Schmelze in die Strukturvertiefungen erschwert. Die Dicke der Randschicht sowie deren Bildungsgeschwindigkeit werden von der Oberflächenstruktur beeinflusst. Ein wärmeisolierender Luftspalt, durch eine überströmte Oberflächenstruktur, kann zum Wideraufschmelzen der Randschale beitragen.

Luftspaltbildung

Beim Überströmen der Oberfläche bilden sich strukturabhängige, wärmeisolierende Luftspalte aus. Das resultierende Luftvolumen wird dabei durch die geometrischen Abmessungen der Struktur definiert. Im horizontalen Guss können Strukturdurchmesser von bis zu 3,0 mm überströmt werden.

Füllung der Struktur

Die Füllung der Strukturen am Ende der Formfüllung ist von den geometrischen Abmessungen der Struktur, dem Strukturnetzwerk, der Oberflächenspannung, dem metallostatistischen Druck und der Festigkeit der Randschicht abhängig. Übersteigt der metallostatische Druck am Ende der Formfüllung den Laplace-Druck und die Festigkeit der erstarrten Randschicht, werden die Oberflächenstrukturen mit durchgängigem Strukturnetzwerk gefüllt. Bei Oberflächenstrukturen mit geschlossenen Strukturnetzwerken sind deutlich höhere Drücke erforderlich.

Anhand der experimentellen Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass das Strukturabbildungsvermögen vom wirkenden metallostatistischen Druck am Ende der Formfüllung abhängig war. Eine grafische Aufbereitung kann Bild 6.20 (240 Pa) und Bild 6.21 (2.100 Pa) entnommen werden. Das ermittelte, prozentuale Strukturabbildungsvermögen wird durch die grauen Säulen repräsentiert. Man erkennt, dass bei einem Druck von 240 Pa das Strukturabbildungsvermögen bei der Mehrzahl der untersuchten Strukturen unter 10 % lag. Strukturen die deutlich besser abgebildet wurden, waren *ccc 1.0*, *ccc 2.0*, *Q-Rille 2,0 mm* und *L-Rille 2,0 mm* (ca. 10 % bis 20 %). Die Strukturen *Q-Rille 4,0 mm*, *Haifisch klein*, und *Haifisch grob* wurden bei diesem geringen Druck bereits zu über 40 % abgebildet. Steigt der Prozessdruck auf ca. 2.100 Pa resultierte bei allen Strukturen ein deutlich verbessertes Strukturabbildungsvermögen. Ausnahmen bildeten die Strukturen *Golfball* und *Carbon*, vgl. Bild 6.21.

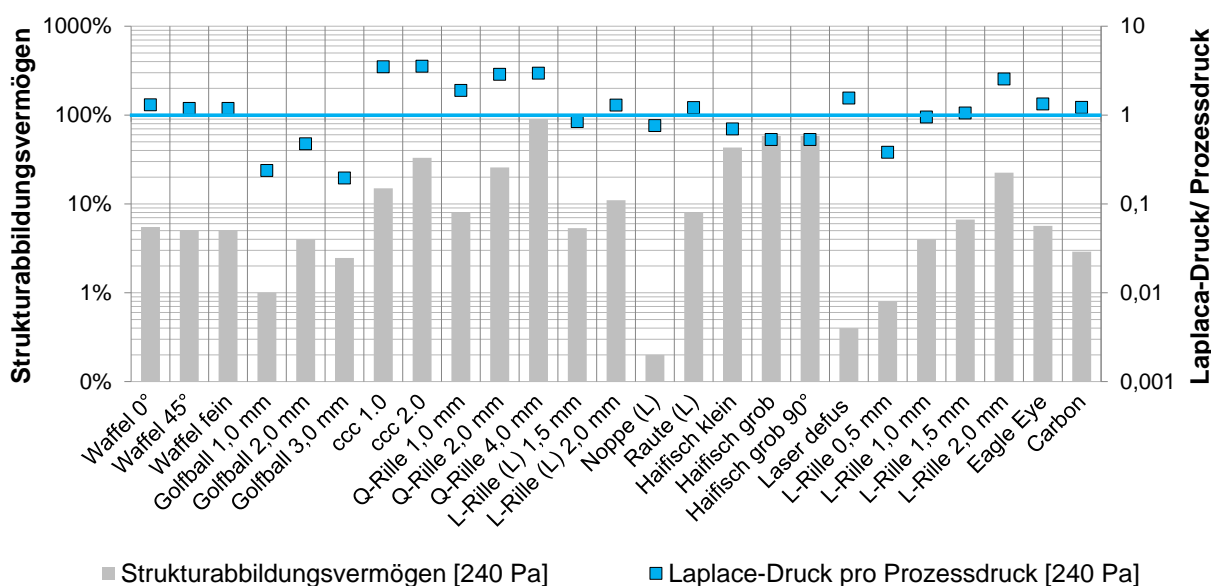


Bild 6.20: Ermitteltes Strukturabbildungsvermögen und Vergleich Laplace- zu Prozessdruck [240 Pa]

Weiterhin werden in den beiden Diagrammen die Verhältnisse aus dem berechneten Laplace-Druck und dem wirkenden Prozessdruck am Ende der Formfüllung dargestellt (blaue Punkte). Die Daten zur Berechnungsgrundlage des Laplace-Druckes sind im Anhang P zu finden. Die jeweilige durchgezogene blaue Linie verdeutlicht das ideale Verhältnis der beiden Druckverhältnisse. Eine Abweichung der Messpunkte nach oben bedeutet, dass der berechnete Laplace-Druck den angenommenen Prozessdruck überstieg. Verantwortlich hierfür könnte die gemessene, strukturabhängige Gussteilwandstärke sein, welche in diesem Falle zu groß wäre. Eine Abweichung der Gussteilwandstärke von 0,01 mm bedingt bereits einen Fehler von ca. 50 %. Grund hierfür könnten Messungenauigkeiten, Vorerstarungseffekte, die Gussteilschwindung sowie die Verformung der Modulplatte durch den Wärmeeintrag der Schmelze sein. Dies traf bei 240 Pa auf die Strukturen *ccc 1.0*, *ccc 2.0*, *Q-Rille 2,0 mm*, *Q-Rille 4,0 mm* und *L-Rille 2,0 mm* zu, vgl. Bild 6.20.

Bei einem Druck von 2.100 Pa ergaben sich hingegen keine nennenswerten Abweichungen nach oben. Wenn der berechnete Laplace-Druck geringer als der Prozessdruck ist, tritt eine Abweichung der Messpunkte nach unten auf. Entsprechend müssten die Strukturen deutlich besser abgebildet sein, als experimentell ermittelt. Dieser Effekt kann jedoch auch strukturbedingt auftreten, vgl. hierzu die Ergebnisse der Strukturen *Golfball* bei 240 Pa und 2.100 Pa. Dieser Strukturtyp weist ein geschlossenes Struktursystem auf, wodurch die eingeschlossene Luft nicht entweichen konnte und diese der eindringenden Schmelze einen zusätzlichen Widerstand entgegenbrachte.

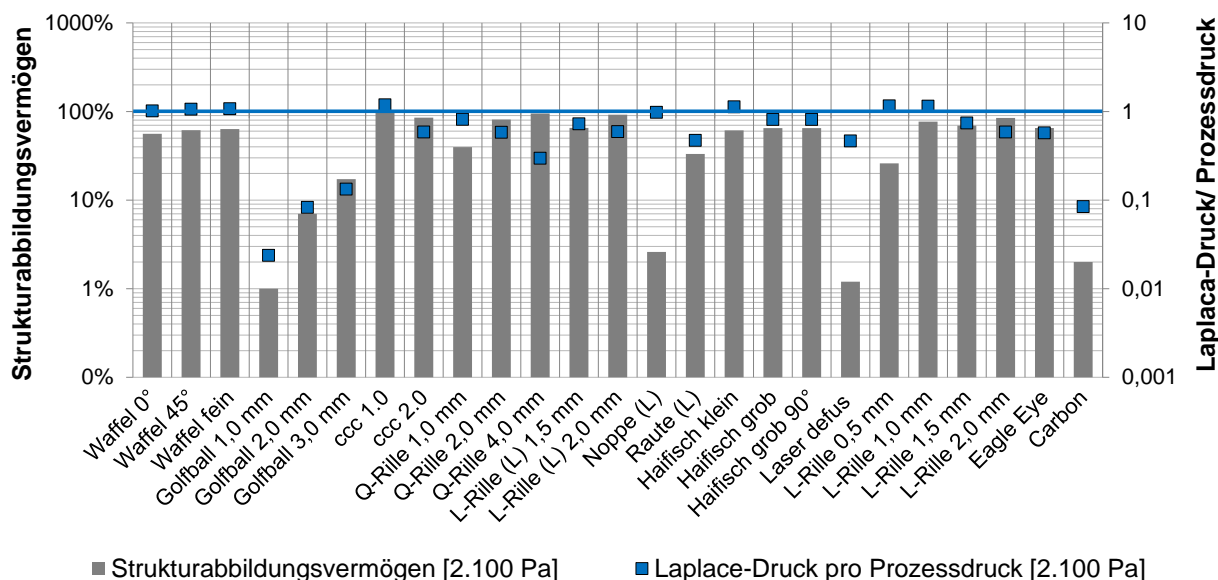


Bild 6.21: Ermitteltes Strukturabbildungsvermögen und Vergleich Laplace- zu Prozessdruck [2.100 Pa]

Anhand der Untersuchungen wurde deutlich, dass alle untersuchten Oberflächenstrukturen, mit Ausnahme der Struktur *Q-Rille 4,0 mm*, während des Formfüllvorganges durch die Schmelze überströmt wurden. Die Überströmung war dabei abhängig von der geometrischen Beschaffenheit der jeweiligen Oberflächenstruktur. Dem entsprechend wurde die Kontaktfläche zwischen Schmelze und Kokille reduziert und es bildete sich ein strukturbedingter Luftspalt aus. Durch einen Druckanstieg wurden das Luftvolumen verdrängt und die Oberflächenstrukturen mit Schmelze gefüllt und vollständig abgebildet.

Dieser Druckanstieg resultierte aus einer gefüllten Kavität, einem zunehmenden Solidusanteil in der Schmelze oder aus einer abgefrorenen Schmelzefront. Die Höhe wurde durch den Eingießtrichter bestimmt.

6.2 Wärmeabfuhr

6.2.1 Simulation

Als weiterer Wirkmechanismus wurde die Beeinflussung der Wärmeabfuhr der Schmelze durch eine Oberflächenstruktur untersucht. Durch die numerischen Untersuchungen sollte geklärt werden, ob die Erstarrungsdauer der Schmelze signifikant reduziert werden kann, um eine Verringerung des λ_2 -Wertes (sekundärer Dendritenarmabstand) in der Gussteilmitte zu erreichen. Das verwendete Berechnungsmodell zur Ermittlung der strukturabhängigen Erstarrungsdauern ist in Bild 6.22 dargestellt.

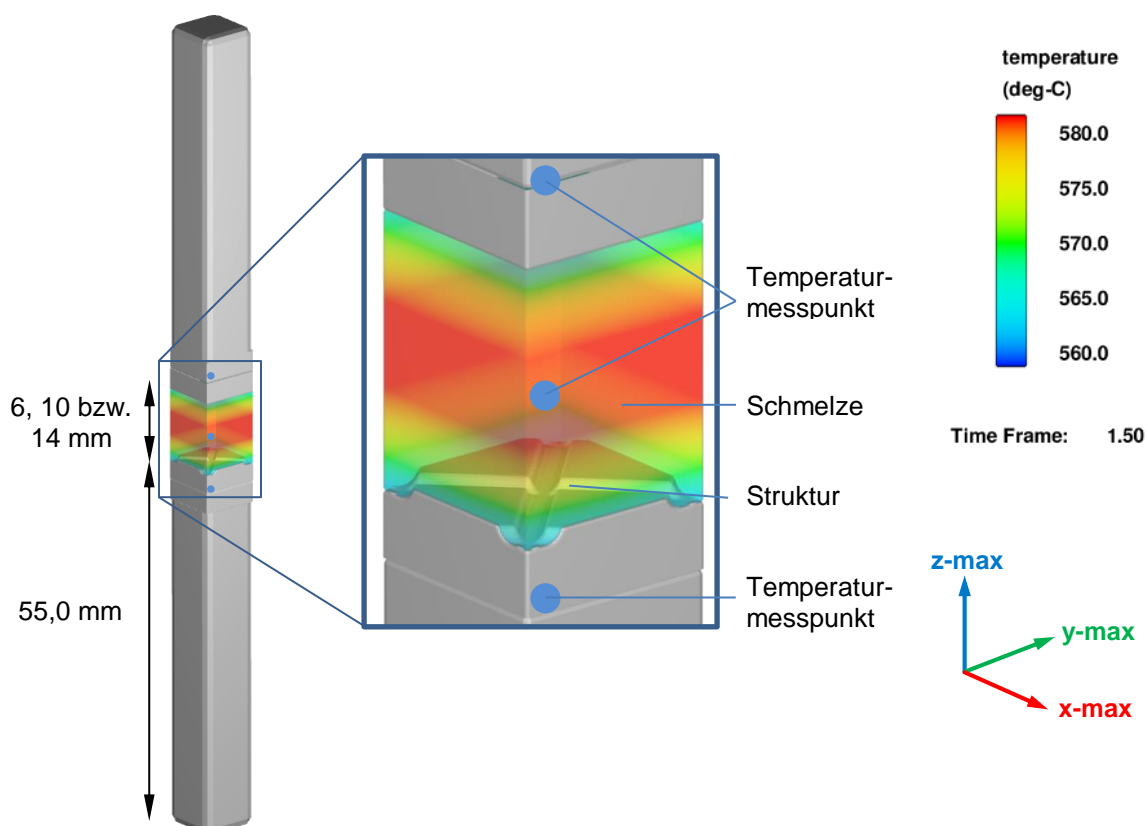


Bild 6.22: Berechnungsmodell *Erstarrung* zur Ermittlung der strukturabhängigen Erstarrungsdauern

Für das Berechnungsmodell wurde ein kleiner Ausschnitt aus der strukturierten Kokillenoberfläche gewählt. Hierbei wurde nur im unteren Kokillenbereich eine Oberflächenstruktur berücksichtigt. Der obere Bereich war glatt. Die Abmessungen des Berechnungsmodelles betragen 8 x 8 mm (B x T), bei einer Gesamthöhe zwischen 116 mm und 128 mm. Es wurde jeweils eine obere und eine untere Ko-

killendicke von 55 mm berücksichtigt. Hierdurch wurde ein zu starkes Aufheizen der Kokille während der Erstarrung vermieden, wodurch die thermophysikalischen Eigenschaften des Kokillenwerkstoffes zum Tragen kamen. Es wurden die drei Gussteilwandstärken 6 mm, 10 mm und 14 mm untersucht. Die Schmelze und die Oberflächenstruktur wurden sehr fein vernetzt (0,1 mm). Mit zunehmendem Abstand zur Kokillenoberfläche wurde die Vernetzung der Kokille stufenweise auf 1,0 mm vergrößert. Bei allen durchgeführten Simulationen war die Vernetzung identisch. Die Elementanzahl betrug zwischen 0,92 und 1,5 Millionen. Die Initialtemperatur der Schmelze und der Kokille betrug 600 °C bzw. 350 °C. Der Wärmeübergangskoeffizient wurde mit 15.000/ 7.500 W/m²K definiert. Die Oberflächenrauheit der Laserstrukturen wurde vereinfacht über die Reduzierung der Kontaktfläche (Surface Area Multiplier = 0,5) beschrieben. Alle wichtigen thermophysikalischen Randbedingungen des Berechnungsmodelles *Erstarrung* sind im Anhang R zusammengefasst.

Die Ermittlung der Erstarrungsdauer (solid fraction = 100 %) erfolgte über den Messpunkt in der Gussteilmitte. Über die Formel (4.17) aus Kapitel 4.2.3 wurde anschließend der λ_2 -Wert berechnet. In diesem vereinfachten Berechnungsmodell wurde die Luftspaltbildung durch nichtausgefüllte Strukturen sowie durch die Schwindung der Schmelze nicht berücksichtigt. Durch die vollständig gefüllten Oberflächenstrukturen nahm geometriebedingt das zu erstarrende Schmelzevolumen zu. Tabelle 6.4 verdeutlicht diesen Effekt stellvertretend für die Strukturen *Waffel 45°* und *ccc 2.0* im Vergleich zu einer glatten Oberfläche.

Tabelle 6.4: Der Einfluss der Oberflächenstruktur auf das Gussteilvolumen und die Kontaktfläche

| Struktur | Gussteilwandstärke | Gussteilvolumen | | Kontaktfläche | |
|-------------------|--------------------|----------------------|---------------------|----------------------|---------------------|
| | | ohne Strukturfüllung | mit Strukturfüllung | ohne Strukturfüllung | mit Strukturfüllung |
| <i>glatt</i> | | 100,0 % | 100,0 % | 100,0 % | 100,0 % |
| | 6 mm | 100,0 % | 102,4 % | 64,0 % | 110,0 % |
| <i>Waffel 45°</i> | 10 mm | 100,0 % | 101,4 % | 64,0 % | 110,0 % |
| | 14 mm | 100,0 % | 101,0 % | 64,0 % | 110,0 % |
| | 6 mm | 100,0 % | 112,9 % | 11,0 % | 116,0 % |
| <i>ccc 2.0</i> | 10 mm | 100,0 % | 107,7 % | 11,0 % | 116,0 % |
| | 14 mm | 100,0 % | 105,5 % | 11,0 % | 116,0 % |

Bei Wandstärken von 6 mm, 10 mm und 14 mm und einer vollständig gefüllten Struktur *ccc 2.0* resultieren Volumenzunahmen von +12,9 %, +7,7 % bzw. +5,5 %. Bei Oberflächenstrukturen, die nachweislich am Ende der Formfüllung nicht gefüllt werden, resultiert keine Volumenzunahme. Dies traf unter anderem auf die Oberflächenstrukturen *Golfball 1,0 mm*, *Golfball 2,0 mm* und *Golfball 3,0 mm* zu.

Stellvertretend zeigt Bild 6.23 zwei Zeit-Temperaturverläufe mit der glatten Oberfläche als Referenz (links) und mit der Struktur *Golfball 1,0 mm* (rechts). Als Bewertungskriterien wurde der Wärmestrom in die Kokille und die Erstarrungsdauer in der Gussteilmitte, wie in Bild 6.23 eingezeichnet, herange-

zogen. Die glatte Oberfläche erzielte eine Erstarrungsdauer von ca. 3,8 s bei einem Wärmestrom von 108,2 J/s und bildete somit die Referenz (100 %). Die wärmeisolierende Oberflächenstruktur *Golfball 1,0 mm* erhöhte die Erstarrungsdauer um +32 %.

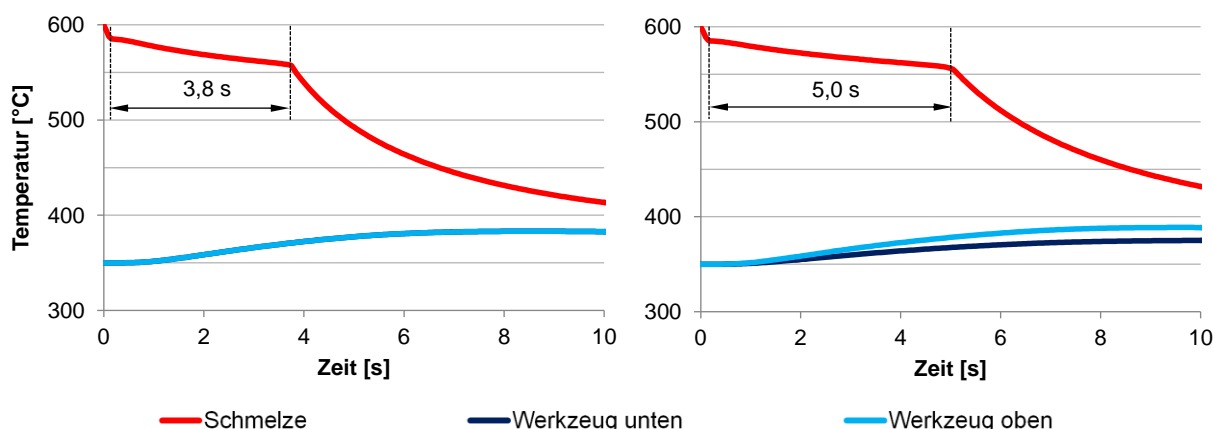


Bild 6.23: Zeit-Temperaturverläufe in der Gussteilmitte bei einer glatten Oberfläche (links) und bei der Struktur *Golfball 1,0 mm* (rechts) mit einer Gussteilwandstärke von jeweils 6,0 mm.

Die nachfolgenden drei Diagramme (Bild 6.24) verdeutlichen die Simulationsergebnisse bezüglich der normierten Erstarrungsdauer sowie die erzielten Wärmeströme in Abhängigkeit von der Oberflächenstruktur und den Gussteilwandstärken 6,0 mm, 10,0 mm und 14,0 mm. Die hellblauen Rauten repräsentieren die normierte Erstarrungsdauer in der Gussteilmitte und die dunkelblauen Säulen stellen die gemittelten, strukturabhängigen Wärmeströme von der Schmelze in die Kokille dar. Bezüglich dieser beider Bewertungskriterien bildete die glatte Oberfläche die Referenz, siehe jeweils links in den Diagrammen. Für eine beschleunigte Erstarrung durch eine Oberflächenstruktur im Vergleich zu einer glatten Oberfläche musste folglich die normierte Erstarrungsdauer $< 100\%$ betragen. Dies wurde bei einer Wandstärke von 6,0 mm nur durch die Strukturen *L-Rille 0,5 mm* (-5,55 %) und *L-Rille 1,0 mm* (-2,75 %) erreicht. Bei den verbleibenden Strukturen war eine deutliche Erhöhung der Erstarrungsdauer zu verzeichnen, vor allem bei den Strukturen *Golfball 1,0 mm* (+35,9 %), *Golfball 2,0 mm* (+30,3 %) und *Golfball 3,0 mm* (+31,2 %). Dies resultierte aus der Randbedingung, dass diese Strukturen am Ende der Formfüllung nicht gefüllt werden. Bei den laserstrukturierten Oberflächen vergrößerte sich die Erstarrungsdauer durchgängig. Ein Grund war die numerische Berücksichtigung der Oberflächenrauheit. So nahm zum Beispiel die Erstarrungsdauer bei der Struktur *Laser diffus* um +23,6 % zu. Durch das Füllen der Oberflächenstrukturen mit Schmelze stieg zwangsläufig das zu erstarrende Volumen, wodurch eine Zunahme der Erstarrungsdauer zu verzeichnen war, vergleiche unter anderem die Ergebnisse der Strukturen *L-Rillen 0,5 mm* bis *L-Rille 2,0 mm*.

Bei den Gussteilwandstärken von 10,0 mm und 14,0 mm erkennt man den positiven Einfluss des reduzierten Schmelzevolumen-Strukturoberflächen-Verhältnisses. Je größer die Gussteilwandstärke und somit das zu erstarrende Volumen, umso zielgerichteter kann eine Oberflächenstruktur zur Reduzierung der Erstarrungsdauer eingesetzt werden. Laut den numerischen Untersuchungen eignen sich hierfür die Strukturen *Waffel* und *L-Rille*. Das beste Ergebnis erzielte die Struktur *L-Rille 0,5 mm* bei der untersuchten Gussteilwandstärke von 14,0 mm (-6,0 %).

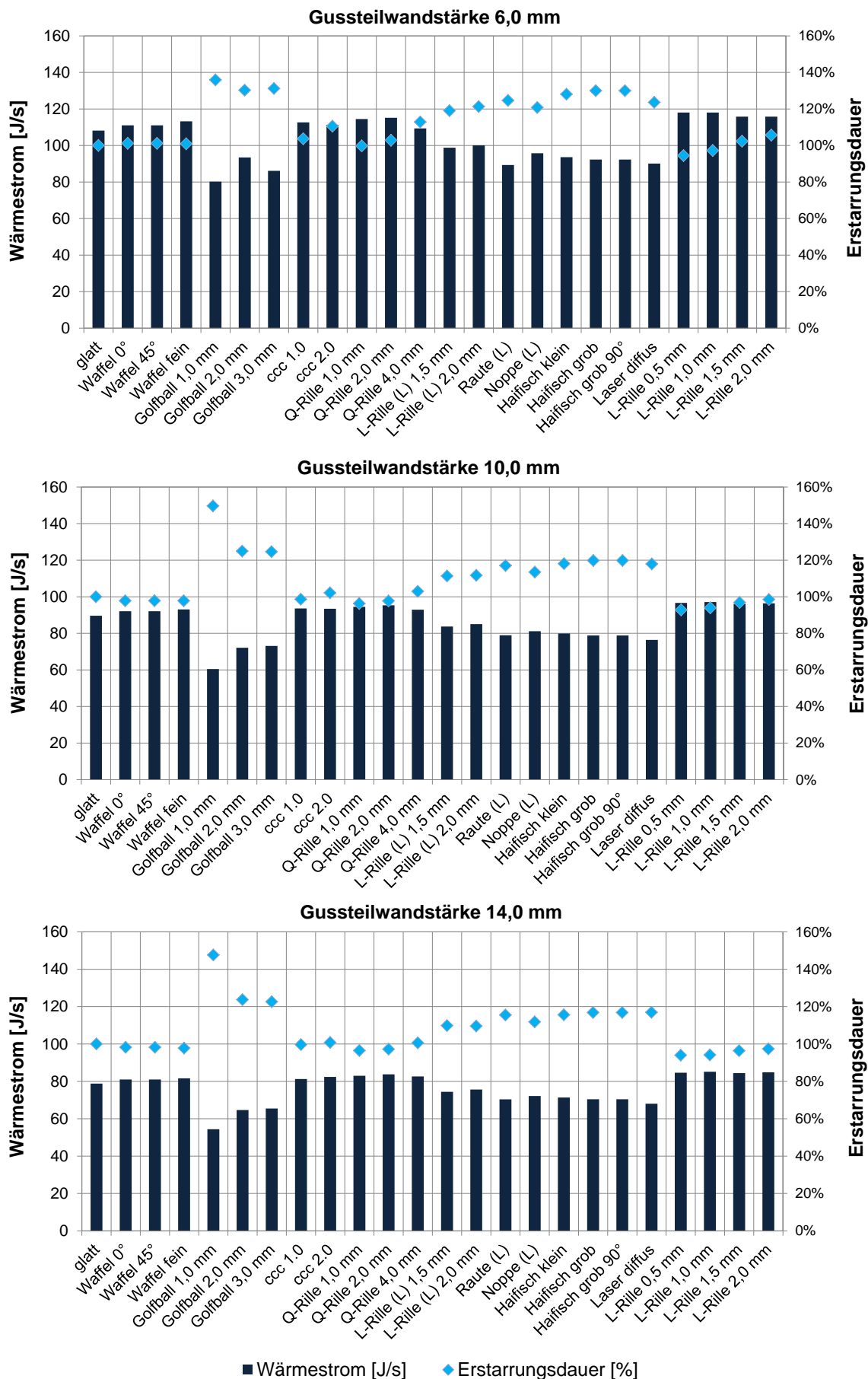


Bild 6.24: Erstarrungsdauer in Abhängigkeit von Oberflächenstruktur und Gussteilwandstärke

Anhand der Untersuchungen wurde erkannt, dass durch eine Oberflächenstruktur der Wärmestrom in die Kokille verbessert werden kann. Jedoch muss das gesteigerte Schmelzevolumen durch die Vergrößerung der Kontaktfläche kompensiert werden, um eine Reduzierung der Erstarrungsdauer in der Gussteilmitte zu erreichen. Als zielführend werden Strukturen bewertet, welche die Oberfläche um mehr als 20 % vergrößern, vergleiche hierzu Anhang S.

6.2.2 Experiment

Zur Validierung der numerischen Ergebnisse wurden entsprechende Gussteile für Gefügeanalysen hergestellt. Bedingt durch den Aufbau der modularen Kokille konnten nur Gussteile mit einer Wandstärke von maximal 6,0 mm hergestellt werden. Die Kavität der Kokille wurde nach 60 mm verschlossen und somit die maximale Fließlänge begrenzt. Hierbei wurden folgende Ziele verfolgt, um mögliche Fehlerquellen zu minimieren:

- Schnellstmögliche Kavitätsfüllung mit minimalem Temperaturverlust der Schmelze.
- Möglichst identisches Schmelzevolumen der 60 mm langen Gussteile.
- Möglichst identische Kokillenaufheizung durch das vergossene Schmelzevolumen.

Bei den durchgeführten Untersuchungen wurde, wie bei den numerischen Untersuchungen, nur die Unterseite strukturiert. Die Oberseite war glatt. Es wurden 14 ausgewählte Oberflächenstrukturen analysiert. Pro Oberflächenstruktur wurden drei Gussteile hergestellt, aus denen an drei definierten Messstellen (MS) je eine Probe entnommen wurde, vgl. Bild 6.25.

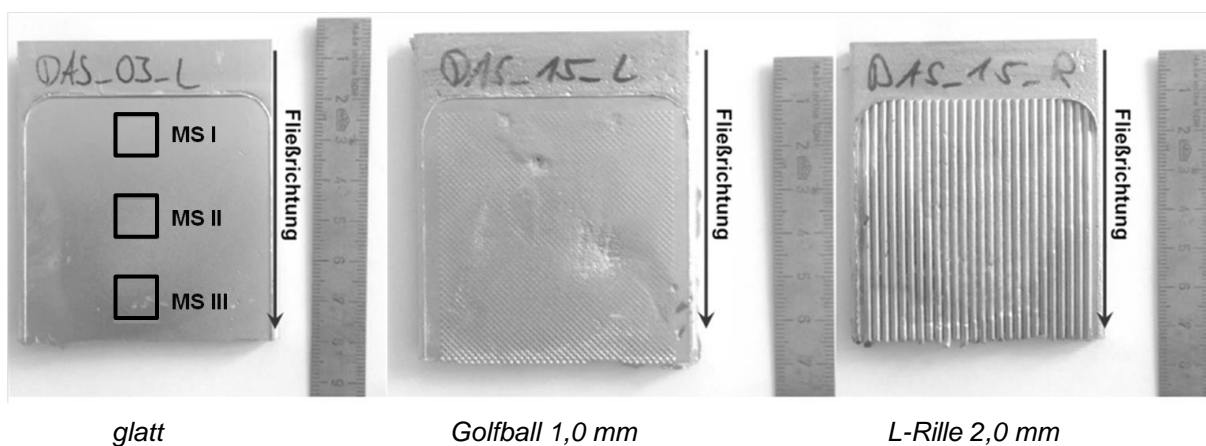


Bild 6.25: 60 mm-Gussteile zur Analyse der λ_2 -Werte mit Markierung der Messstellen (MS) I, II und III

Jede entnommene Messstelle wurde geschliffen, poliert und mikroskopiert. Hierzu wurden Stitching-Aufnahmen mit 200-facher Vergrößerung über den Gussteilquerschnitt von 6,0 mm angefertigt und an fünf definierten Bereichen λ_2 -Messungen nach BDG-Richtlinie P220 [107; 172] durchgeführt. Die Bereiche wurden in oberer und unterer Randbereich (RB), oberer und unterer Übergangsbereich (ÜB)

und Fließbereich (FB) unterteilt, vgl. Bild 6.26 rechts. In jedem der fünf Bereiche wurden zehn λ_2 -Messungen durchgeführt. Bezogen auf die 14 Oberflächenstrukturen ergaben sich insgesamt 6.300 durchgeführte Messungen.

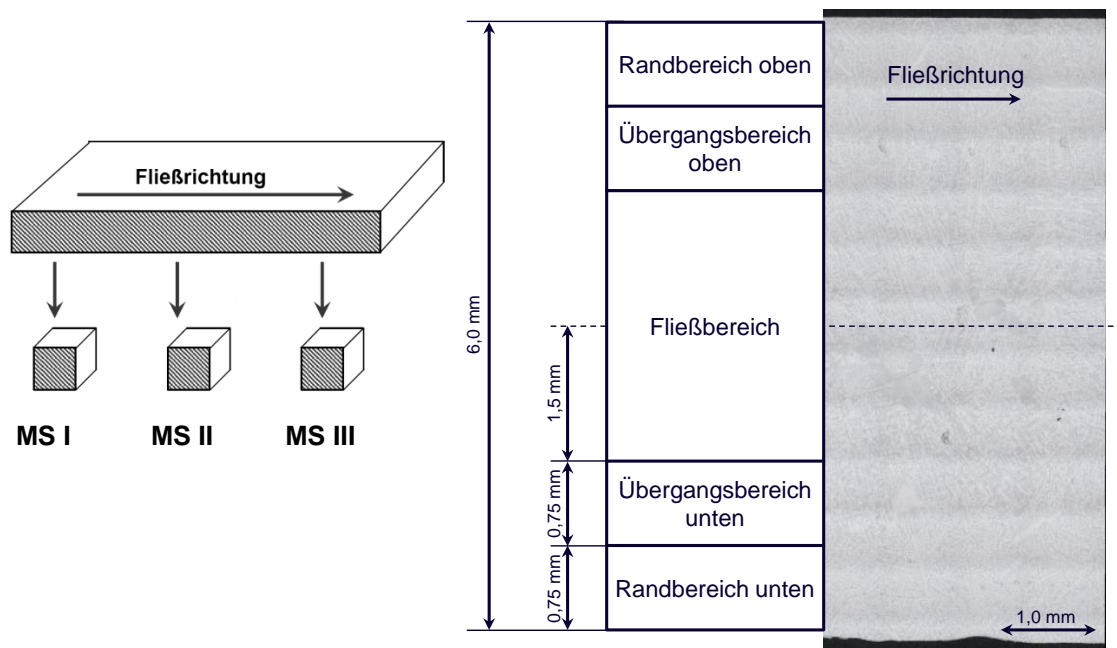


Bild 6.26: Messstellenentnahme und Definition der fünf Messbereiche über den Gussteilquerschnitt

In Bild 6.27 ist die Auswertung der λ_2 -Messung der 14 untersuchten Oberflächenstrukturen dargestellt. Eine tabellarische Auswertung kann Anhang T entnommen werden. Die fünf Messpunkte pro Struktur repräsentieren die fünf definierten Messbereiche über den Gussteilquerschnitt und sind gemittelt über die drei Gussteile á drei Messstellen. Die prozentualen Abweichungen der λ_2 -Messungen lagen im Schnitt bei 10 bis 20 %. Dennoch wurde der Geltungsbereich der BDG P220 erfüllt (Differenz zwischen Median und dem Mittelwert $< 0,5 \mu\text{m}$).

Anhand des Diagrammes erkennt man, dass die λ_2 -Werte im oberen RB deutlich kleiner waren ($\bar{\lambda}_2 \approx 8,9 \mu\text{m}$) als im unteren RB ($\bar{\lambda}_2 \approx 10,9 \mu\text{m}$). Dies kann mit der Kokillentemperatur erklärt werden. Bedingt durch den Versuchsaufbau und der externen Aufheizung von unten, war die glatte Modulplatte im Kokillenoberteil stets kälter als die strukturierten Modulplatten im Kokillenunterteil. Im unteren RB ist die Streuung der λ_2 -Werte deutlich größer. Diese reichten im unteren RB von $9,63 \mu\text{m}$ bis $12,58 \mu\text{m}$ und im oberen RB von $8,02 \mu\text{m}$ bis $9,78 \mu\text{m}$. Dies war auf den Einfluss der Oberflächenstrukturen auf die Erstarrungsdauer der Schmelze zurückzuführen.

Alle Gussteile wiesen strukturabhängige, vergrößerte λ_2 -Werte über alle fünf Bereiche, im Vergleich zu einer glatten Oberfläche, auf. Ausnahmen bildeten die Strukturen *Waffel 45°* und *ccc 1.0* mit den geringsten λ_2 -Werten ($11,4 \mu\text{m}$ und $12,1 \mu\text{m}$) im FB. Die Strukturen *Noppe (L)* und *Q-Rille 2,0 mm* erzielten die größten λ_2 -Werte ($14,1 \mu\text{m}$ und $14,7 \mu\text{m}$) im FB. Bei der Struktur *Q-Rille 2,0 mm* kann dies durch die Zunahme des Schmelzevolumens von $+7,8 \%$ begründet werden. Bei der Struktur *Noppe (L)* wurden nachweislich die Vertiefungen nicht vollständig gefüllt. Die Erstarrungsdauer verzögerte sich aufgrund der rauen, gelaserten Oberfläche deutlich.

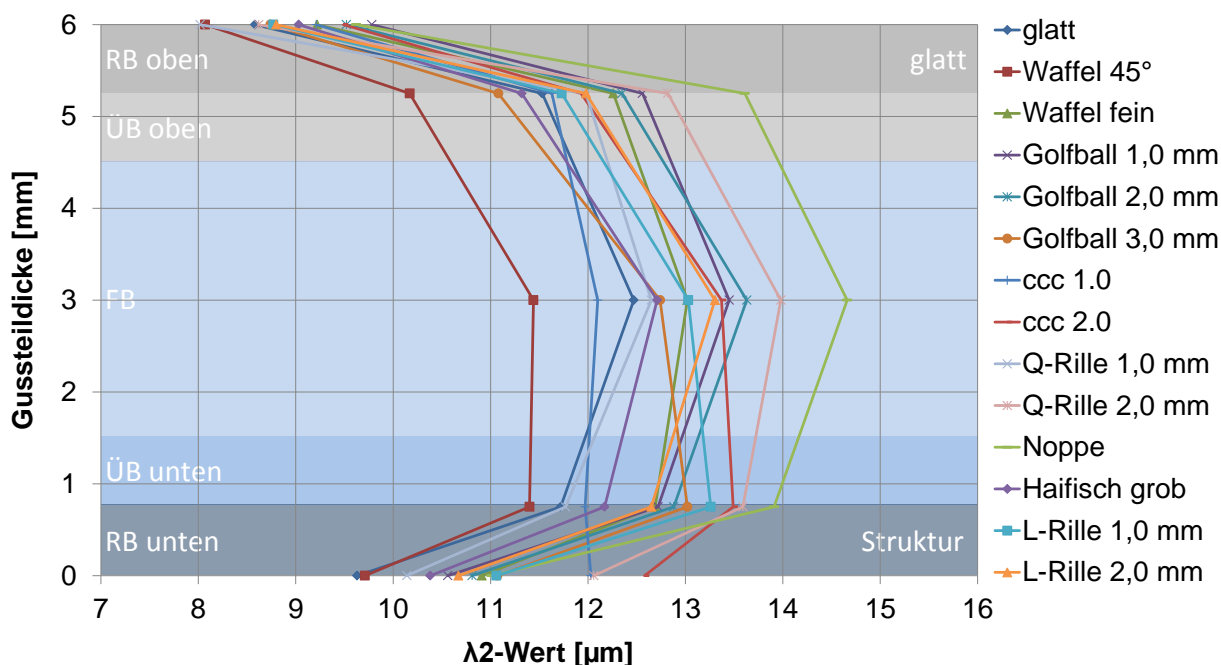


Bild 6.27: Verteilung der λ_2 -Werte in Abhängigkeit von der Oberflächenstruktur

Die wärmeisolierende Wirkung während der Erstarrung der Golfballstrukturen konnte im unteren RB (+10 % bis +15 %) und im FB (+2 % bis +10 %) bestätigt werden. Da die Strukturen nicht gefüllt wurden, bildeten sich wärmeisolierende Luftspalte aus. Die Wärmeisolation wirkte während der Füllung, der Erstarrung und der Abkühlung.

Mit Zunahme der Strukturgröße vergrößerten sich die λ_2 -Werte. Dies war auf die Verlängerung der Erstarrungsdauer zurückzuführen und deckte sich mit den Erkenntnissen aus den numerischen Untersuchungen.

| | | | | | |
|------------------------|---------------------|---|------------------------|---------------------|-----------|
| <i>Golfball 1,0 mm</i> | 13,45 μm | → | <i>Golfball 2,0 mm</i> | 13,63 μm | (+1,3 %) |
| <i>ccc 1.0</i> | 12,10 μm | → | <i>ccc 2.0</i> | 13,37 μm | (+10,5 %) |
| <i>Q-Rille 1,0 mm</i> | 12,65 μm | → | <i>Q-Rille 2,0 mm</i> | 13,98 μm | (+10,5 %) |
| <i>L-Rille 1,0 mm</i> | 13,03 μm | → | <i>L-Rille 2,0 mm</i> | 13,30 μm | (+2,1 %) |

6.2.3 Zusammenfassung

Bild 6.28 stellt die gemessenen und die numerisch aus der Erstarrungsdauer ermittelten λ_2 -Werte gegenüber. Die Ergebnisse stimmen in einem guten Maße überein.

Bei den glatten Oberflächen bzw. den Strukturen *Waffel fein*, *Golfball 1,0 mm*, *Golfball 2,0 mm*, *ccc 1.0*, *ccc 2.0*, *Q-Rille 1,0 mm*, *Q-Rille 2,0 mm*, *Noppe* (*L*), *L-Rille 1,0 mm* und *L-Rille 2,0 mm* konnte eine Übereinstimmung mit einer Abweichung von weniger als 10 % erzielt werden. Bei den Strukturen *Waffel 45°*, *Golfball 3,0 mm* und *Haifisch grob* ergaben sich Abweichungen zwischen Simulation und Experiment von mehr als 10 %. Es ist möglich, dass die Abweichungen bei diesen drei Strukturen auf

Mess- und Prozessgenauigkeiten zurückzuführen sind. In Frage kommen hier die Gieß- und Kokillentemperatur sowie die Gießgeschwindigkeit.

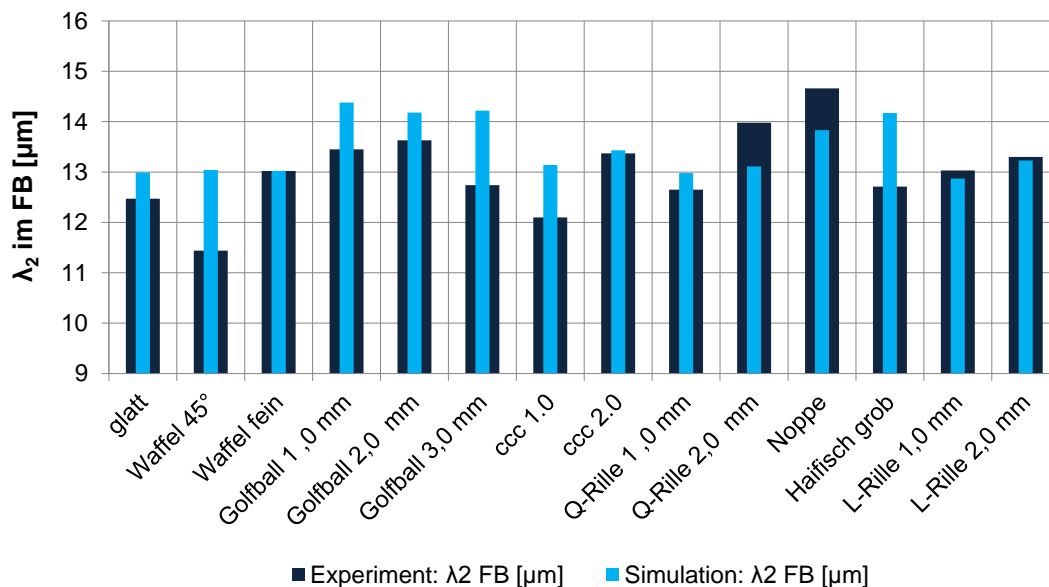


Bild 6.28: Ermittelte λ_2 -Werte im Fließbereich (FB) aus der Simulation und dem Experiment

Allgemein lassen sich die gezeigten Differenzen zwischen Simulation und Experiment wie folgt erklären: Das verwendete Berechnungsmodell *Erstarrung* bediente sich zahlreicher Vereinfachungen. So wurde zum Beispiel nur die Erstarrung ohne vorherige Füllung betrachtet. Wie aus Kapitel 6.1.2 ersichtlich, werden die Oberflächenstrukturen bei einem metallostatischen Druck von 2.100 Pa nicht zu 100 % abgebildet. Die gelaserten Strukturen und deren Oberflächenrauheiten werden tendenziell schlechter durch die Schmelze abgebildet. Das Resultat sind feine Luftspalte sowie eine reduzierte Kontaktfläche während der Erstarrung. Dieser Effekt wurde in der Simulation nur vereinfacht beschrieben. Des Weiteren führt die auftretende Schwindung beim realen Gussteil zu Einfallstellen und zu einer partiellen Ablösung von der Kokille, wodurch der Wärmestrom zwischen erstarrender Schmelze und Kokille weiter reduziert wird. Dieser Effekt wurde ebenfalls in der Simulation nicht berücksichtigt.

Zur Verdeutlichung der Wirkung der Oberflächenstrukturen auf das Gieß- und Gussteilergebnis dient Bild 6.29. Aufgetragen sind die experimentell ermittelten Fließlängenänderungen [%] über der Änderung der experimentell ermittelten λ_2 -Werte [μm] im FB der Gussteile. Die Referenz bildete das Gussteil mit der glatten Oberfläche und ist entsprechend im Koordinatenursprung dargestellt. Hierdurch ließen sich vier Bereiche aus dem Diagramm ableiten:

- Bereich I: Wärmeisolation während der Füllung und verzögerte Erstarrung
- Bereich II: Wärmeisolation während der Füllung und beschleunigte Erstarrung
- Bereich III: Hohe Wärmeabfuhr während der Füllung und beschleunigte Erstarrung
- Bereich IV: Hohe Wärmeabfuhr während der Füllung und verzögerte Erstarrung

Ein Großteil der untersuchten Oberflächenstrukturen befinden sich im Bereich I. Es kann geschlussfolgert werden, dass die Strukturen während der Formfüllung wärmeisolierend auf die Schmelze wirkten und die Erstarrung verzögert wurde. Dies kann mit der Luftspaltbildung zwischen Schmelze und Kokille und der Reduzierung der effektiven Kontaktfläche begründet werden.

Im Bereich II befinden sich die Strukturen *Waffel 45°* und *ccc 1.0* welche, im Vergleich zur Referenz, einen geringeren λ_2 -Wert bei gleichzeitiger Steigerung der Fließlänge zeigten. Der Bereich III wird bisher nur durch eine glatte, polierte Oberfläche repräsentiert. Durch das Polieren der Oberfläche wurde der R_z -Wert von 6,3 μm auf 1,0 μm reduziert, mit dem Ergebnis, dass sowohl der λ_2 -Wert als auch die Fließlänge verringert wurden. Der Bereich IV wird definiert durch eine hohe Wärmeabfuhr während der Füllung und einer verzögerten Erstarrung. Dieser Bereich konnte durch keine untersuchte Oberflächenstruktur repräsentiert werden.

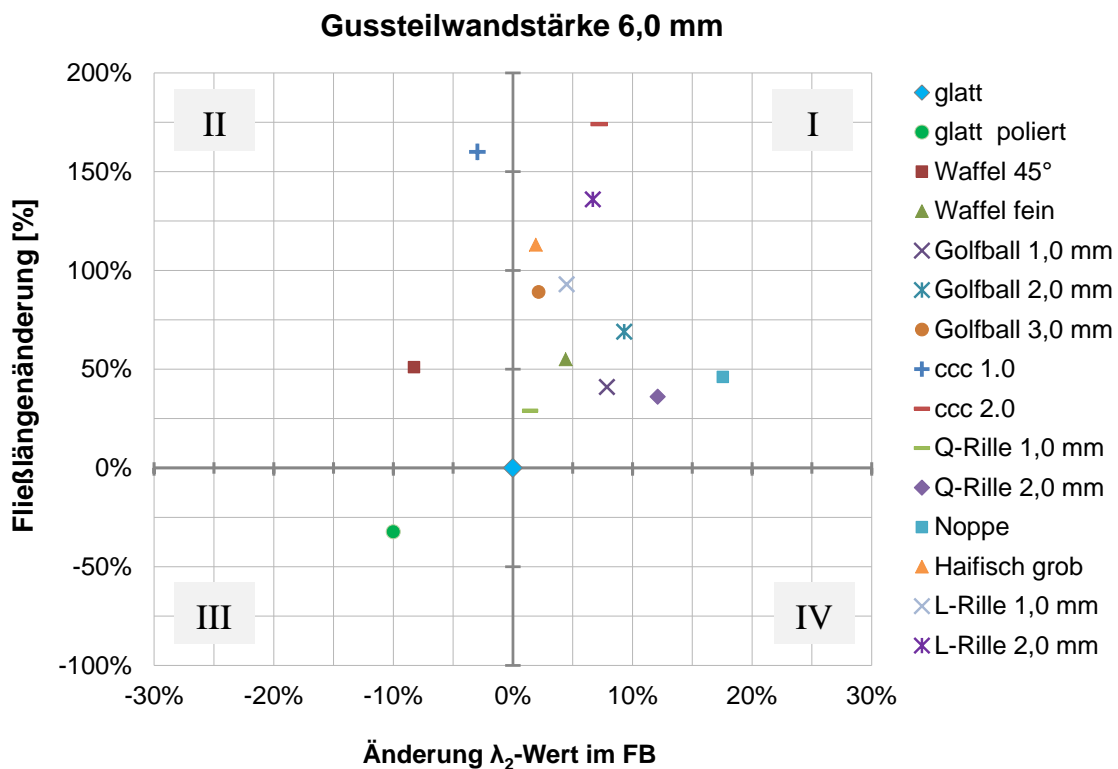


Bild 6.29: Strukturabhängige Fließlängenänderung über dem λ_2 -Wert im FB der Gussteile

Anhand der durchgeführten numerischen und experimentellen Untersuchungen wurde festgestellt, dass eine Oberflächenstruktur die Erstarrungsdauer der Schmelze nicht signifikant reduzieren kann. Leichte Vorteile zeigten sich im Experiment bei den Strukturen *Waffel 45°* und *ccc 1.0* und in der Simulation bei den Strukturen *L-Rille 0,5 mm*, *L-Rille 1,0 mm* und *L-Rille 1,5 mm*. Erwartungsgemäß zeigte sich, dass durch die Vergrößerung des Schmelzevolumens die Erstarrungsdauer vergrößert wurde. Eine Oberflächenstruktur kann den Wärmestrom zwischen Schmelze und Kokille verbessern, jedoch muss das vergrößerte Schmelzevolumen durch eine gefüllte Oberflächenstruktur kompensiert werden.

6.3 Aufreißen der Oxidhaut

6.3.1 Simulation

Der Stand der Technik besagt, dass raue Schichten bzw. scharfkantige Oberflächenstrukturen in der Lage sind, die Oxidhaut an der Schmelzefront „aufzureißen“, wodurch der Strömungswiderstand reduziert und die Fließlänge verbessert werden kann. Die durchgeführten numerischen Untersuchungen sollen das entsprechend mögliche Potenzial zur Verbesserung der Fließlänge aufzeigen.

Für die Simulation wurde das Berechnungsmodell *Fließlänge* aus Kapitel 5.1.1 verwendet. Die einzige Änderung im Berechnungsmodell bestand darin, dass oben und unten jeweils glatte Oberflächen berücksichtigt wurden. Die verbleibenden Randbedingungen und definierten Größen waren identisch. Da in der Simulation mit Flow 3D keine Oxidhautbildung und -festigkeit berücksichtigt werden konnte, wurde diese vereinfacht beschrieben. Hierbei wurde sich an der Empfehlung von Szalai [68] orientiert. Szalai kombinierte die Oberflächenspannung und die Oxidhaut zum sogenannten Oberflächenparameter [N/m], welcher durch die Anpassung und Variation der Oberflächenspannung in der Simulation berücksichtigt wurde.

Zur Einflussanalyse des Oberflächenparameters auf die Fließlänge wurde dieser im Berechnungsmodell *Fließlänge* zwischen 0,05 N/m und 1,8 N/m variiert. Entsprechend wurde dem Voranschreiten der Schmelzefront ein parametrierter Strömungswiderstand entgegengesetzt. Zusätzlich wurde der kombinierte Einfluss mit vier Strömungsgeschwindigkeiten 0,05 m/s, 0,075 m/s, 0,1 m/s und 0,2 m/s analysiert. Dies ging auf die Behauptung von Flemings [61] zurück, dass die Oberflächenspannung nur einen nennenswerten Einfluss auf die Fließlänge bei schmalen Gießkanälen und Strömungsgeschwindigkeit kleiner als 0,1 m/s besitzt.

In Bild 6.30 ist die Auswertung der numerischen Untersuchungen zusammengefasst. Dargestellt sind die numerisch ermittelten Fließlängen [%] in Abhängigkeit vom Oberflächenparameter [N/m] und der Strömungsgeschwindigkeit [m/s]. Als Bewertungskriterium diente die maximale Fließlänge. Die Referenzen bildeten stets die vier erzielten Fließlängen mit den Strömungsgeschwindigkeiten 0,05 m/s, 0,075 m/s, 0,1 m/s und 0,2 m/s bei einem Oberflächenparameter von 0,9 N/m. Hierdurch wurde der Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit auf die Fließlängen untereinander eliminiert. Wie dem Diagramm und den logarithmischen Funktionen zu entnehmen ist, hat die Variation des Oberflächenparameters bei hohen Werten ($>0,8$ N/m) einen sehr geringen Einfluss auf die resultierende Fließlänge (± 5 %). Dieses Ergebnis zeigte sich bei allen untersuchten Strömungsgeschwindigkeiten. Erst unterhalb von ca. 0,5 N/m erhöhte sich die maximale Fließlänge, speziell für die höheren Strömungsgeschwindigkeiten von 0,1 m/s und 0,2 m/s, signifikant. Dies kann mit dem reduzierten Strömungswiderstand begründet werden, widerspricht jedoch den Erwartungen aus dem Stand der Technik, bzw. der Aussage von Flemings [61].

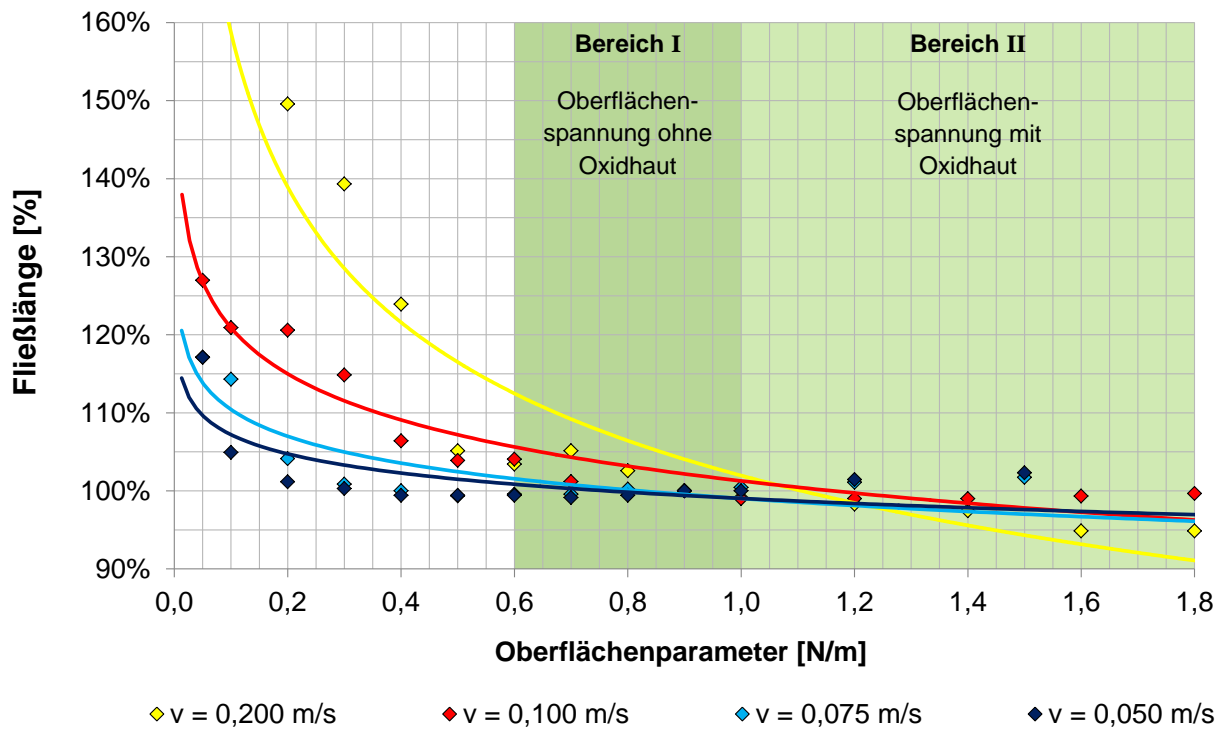


Bild 6.30: Einfluss des Oberflächenparameter und der Strömungsgeschwindigkeit auf die Fließlänge

Typische Werte für die Oberflächenspannung von flüssigem Aluminium ohne Oxidhaut liegen zwischen 0,6 und 1,0 N/m [25; 173]. Diese Werte werden im Diagramm durch den Bereich I dargestellt. Durch Vorhandensein einer Oxidhaut kann sich dieser Wert auf bis zu 1,8 N/m [68; 90; 91] erhöhen, vgl. Bereich II. Es kann davon ausgegangen werden, dass es ohne Oxidhaut zu einer Verschiebung des Oberflächenparameters von Bereich II zu Bereich I kommt, wodurch die Fließlänge um +5 % bis +10 % in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit gesteigert werden kann. Das gleiche Fließlängenpotenzial würde eine ideale Oberflächenstruktur erzielen, welche die Oxidhaut optimal „aufreißt“.

6.3.2 Experiment

Zur Verdeutlichung des möglichen Potenzials zur Verbesserung der Fließlänge durch ein optimales „Aufreißen“ der Oxidhaut sollen die nachfolgenden drei Beispiele dienen:

| Oberfläche | Atmosphäre | Oberflächen- spannung | Oxidhaut- festigkeit | Oberflächen- parameter | theoretische Fließlänge |
|--------------|------------|--------------------------|-------------------------|---------------------------|----------------------------|
| glatt | Luft | 100 % | 100 % | 200 % | 100 % |

Beispiel 1: Die durch den Luftsauerstoff gebildete Oxidhaut begrenzt die theoretische Fließlänge (100 %). Das „Aufreißen“ wird nicht unterstützt. Die Oberflächenspannung (100 %) sowie die Oxidhaut (100 %) ergeben den zusammengefassten Oberflächenparameter (200 %).

| | | | | | |
|--------------|-------|-------|-----|-------|--------------|
| glatt | Argon | 100 % | 0 % | 100 % | 150 % |
|--------------|-------|-------|-----|-------|--------------|

Beispiel 2: Unter Argon-Atmosphäre wird die Bildung der Oxidhaut vollständig unterdrückt (0 %). Ohne Oxidhaut reduziert sich der Oberflächenparameter (100 %), wodurch die theoretische Fließlänge gesteigert werden kann (150 %).

| | | | | | |
|-----------------|------|-------|-----|-------|--------------|
| Struktur | Luft | 100 % | 0 % | 100 % | 150 % |
|-----------------|------|-------|-----|-------|--------------|

Beispiel 3: Die Oxidhaut (0 %) wird durch den Luftsauerstoff gebildet und durch eine raue Schlichte oder durch eine scharfkantige Oberflächenstruktur optimal „aufgerissen“. Hierdurch verringert sich der Oberflächenparameter (100 %) und eine Reduzierung des Strömungswiderstandes wird erreicht. Die theoretische Fließlänge kann hierdurch gesteigert werden (150 %).

Diese drei Beispiele verdeutlichen, dass die maximale Fließlänge, durch ein optimales „Aufreißen“ der Oxidhaut, maximal der erreichten Fließlänge unter einer Argon-Atmosphäre entspricht. Dieser theoretische Ansatz soll in den nachfolgenden experimentellen Untersuchungen analysiert werden.

Für die Gießversuche unter Argon-Atmosphäre wurde die modulare Kokille mit dem Schutzgasmodul, wie in Bild 5.5 abgebildet, verwendet. Dieses Modul wurde am hinteren Ende der Kokille befestigt und ermöglichte über die Entlüftungskanäle die Spülung der Kavität mit dem Schutzgas Argon. Die umlaufende Nut mit Dichtung zwischen dem Kokillenunter- und dem Kokillenoberteil dichtete die Kavität gegenüber der Luft-Atmosphäre ab. Wie in der Simulation wurden bei den Gießversuchen nur glatte Oberflächen analysiert. Die Kokille wurde vor jedem Abguss fünf Minuten lang mit reinem Argon bzw. Druckluft gespült. Hierdurch kühlte die Kokille um 3 °C bis 5 °C leicht aus. Eine Messung der Argon-Konzentration erfolgte nicht. Kurz vor Beginn des Abgusses wurde der Druckschlauch am Schutzgasmodul abgezogen und somit die Entlüftung der Kavität während des Formfüllvorganges über den Absperrhahn sichergestellt. Insgesamt wurden 12 Gussteile hergestellt. Bild 6.31 stellt die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen gegenüber.

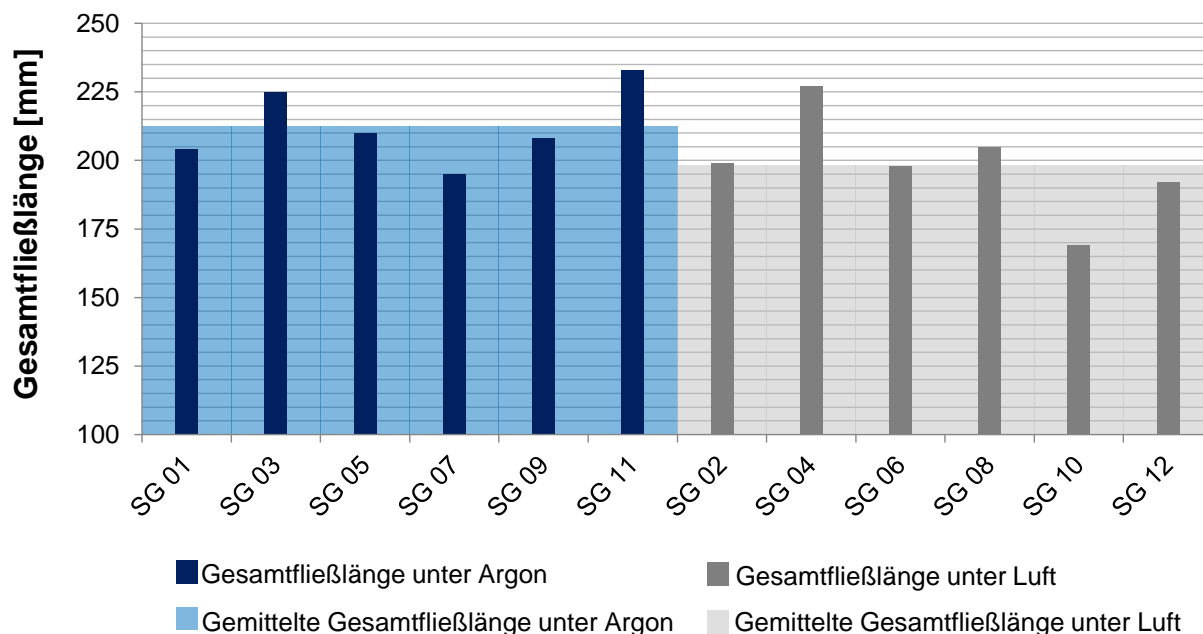


Bild 6.31: Gesamtlängen unter Argon-Atmosphäre (links) und Luft-Atmosphäre (rechts)

Dargestellt sind die erzielten Gesamtlängen [mm], also die summierten Fließlängen des linken und rechten Gussteilbereiches, in Abhängigkeit von der umgebenden Atmosphäre. Es wurde im Wechsel mit Argon-Atmosphäre und mit Luft-Atmosphäre gegossen, vgl. Gussteilbezeichnung SG 01 bis SG 12. Die zwei Bereiche im Diagramm verdeutlichen die gemittelten Gesamtlängen. Unter Argon-Atmosphäre betrug die Fließlänge im Mittel 212,5 mm. Die gemittelte Gesamtlänge unter Luft-Atmosphäre hingegen 198,3 mm. Prozentual konnte eine Verbesserung der Gesamtlänge von +7 % erzielt werden.

Anhand der hergestellten Gussteile konnte man erkennen, dass es eine Abhängigkeit zwischen dem Erscheinungsbild und der verwendeter Atmosphäre gab. Alle unter Luft-Atmosphäre abgegossenen Gussteile wiesen durchgängig eine glänzende Oberfläche auf. Die Gussteile unter Argon-Atmosphäre waren primär durch eine matte Oberfläche gekennzeichnet, mit Ausnahme im Bereich des Gießsystems. Dieser Sachverhalt kann wie folgt erklärt werden: Während des Einfüllens der Schmelze bildete sich durch den Kontakt mit dem Luftsauerstoff stets ein Gießschlauch aus Aluminiumoxid. Dieser wurde zwangsläufig mit in das Gießsystem eingetragen und setzte sich an der Oberfläche der Kokille ab. Durch die Argon-Atmosphäre in der Kavität wurde die Neubildung unterdrückt, wodurch eine Art „Schollenbildung“, mit matten und glänzenden Stellen im Bereich des Gießsystems auf der Gussteiloberfläche, sichtbar wurde. Die verbleibenden Gussteilbereiche waren vollständig matt. Es kann davon ausgegangen werden, dass es sich hierbei um oxidhautbehaftete und oxidhautfreie Bereiche auf der Gussteiloberfläche handelte.

Bild 6.32 zeigt ein unter Argon-Atmosphäre hergestelltes Gussteil sowie die beschriebene „Schollenbildung“ im Bereich des Gießsystems. Man erkennt deutlich die matten und glänzenden Stellen.

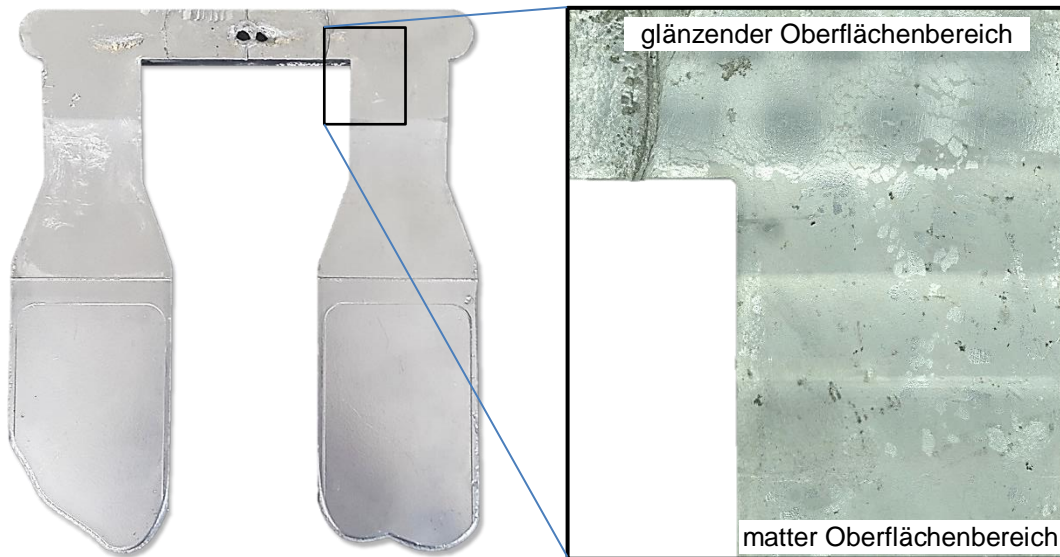


Bild 6.32: Unter Argon-Atmosphäre hergestelltes Gussteil mit „Schollenbildung“ im Gießsystembereich

Eine Analyse der Gussteiloberfläche mit einem Digitalmikroskop bestätigte die Annahme der oxidhautbehafteten und der oxidhautfreien Bereiche, vgl. Bild 6.33. Die Gussteilbereiche, die mit Jungoxiden aus dem Eingießvorgang bedeckt waren, wiesen eine homogenere Oberflächentopographie auf. Einfallendes Licht konnte sehr gut reflektiert werden, wodurch die Oberfläche glänzend erschien. Die matten Oberflächenbereiche waren durch eine deutlich rauere Oberflächentopographie gekennzeichnet. Hier blickte man direkt auf die Spitzen der dendritischen Gefügestruktur. Diese Erkenntnisse deckten sich mit den Aussagen und Untersuchungen von Szalai [68] und Korolkow [80].

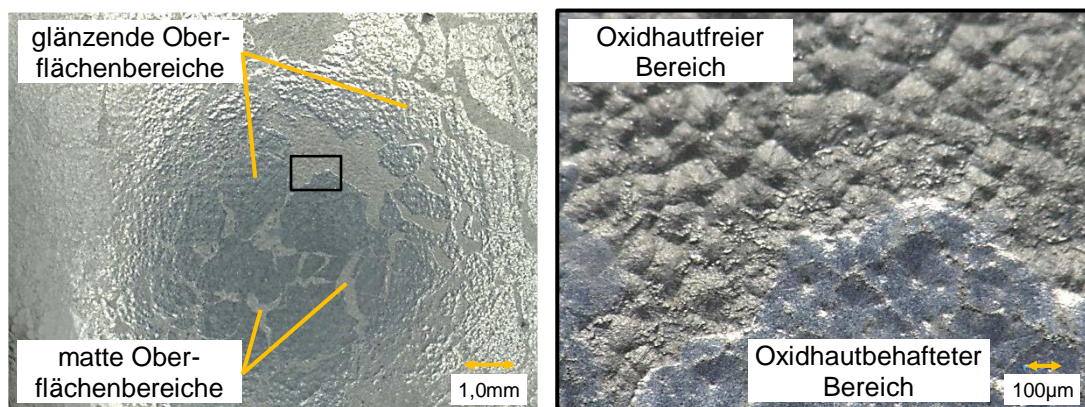


Bild 6.33: Mikroskopische Aufnahme der Gussteiloberfläche mit 20 und 200-facher Vergrößerung

Die experimentellen Untersuchungen und Analysen haben gezeigt, dass die Oxidhautbildung durch den Einsatz einer Argon-Atmosphäre unterdrückt werden konnte. Die vollständige Unterdrückung ist gleichbedeutend mit einem idealen „Aufreißen“ der Oxidhautbildung durch eine raue Schlichte oder einer scharfkantigen Oberflächenstruktur. Durch die entsprechende Reduzierung des Strömungswiderstandes konnte die Fließlänge um ca. 7 % gesteigert werden.

6.3.3 Zusammenfassung

Bei den durchgeführten numerischen Untersuchungen wurde der Einfluss des Oberflächenparameters und der Strömungsgeschwindigkeit auf die Fließlänge analysiert. Die Variation des Oberflächenparameters erfolgte zwischen 0,1 N/m und 1,8 N/m bei Strömungsgeschwindigkeiten von 0,05 m/s bis 0,2 m/s. Durch die Reduzierung des Oberflächenparameters auf $0,6 \text{ N/m} < \sigma < 0,8 \text{ N/m}$ zeigte sich ein geringes Potenzial zur Verbesserung der Fließlänge von 5 % bis 10 %.

Die experimentellen Untersuchungen fanden unter Luft- bzw. Argon-Atmosphäre statt. Ziel war die Ermittlung der maximalen Fließlänge ohne den Einfluss einer Oxidhaut, gleichbedeutend mit dem optimalen „Aufreißen“ der Oxidhaut durch eine scharfkantige Oberflächenstruktur während des Gießprozesses. Die Gussteilanalysen zeigten, dass unter Argon-Atmosphäre die Oxidhautbildung in der Kavität vollständig unterdrückt werden konnte. Hierbei wurde im Vergleich zur Luft-Atmosphäre eine Fließlängensteigerung von ca. +7 % erzielt. Um diese ersten Ergebnisse weiter zu untermauern werden weiterführende Untersuchungen als vorteilhaft erachtet. Die bislang ermittelte Fließlängensteigerung sowie die festgestellten Gussteilmerkmale deckten sich mit den bekannten Erfahrungen und Untersuchungen aus dem Stand der Technik.

Es kann festgehalten werden, dass durch den Einsatz einer scharfkantigen Oberflächenstruktur, welche die Oxidhaut optimal „aufreißt“ die Fließlänge lediglich um ca. 5 % bis 10 % verbessert werden könnte.

In Anbetracht der Bildungsgeschwindigkeit von Al_2O_3 und den derzeitigen Strukturdimensionen ist dieser physikalische Ansatz zur Verbesserung der Fließlänge als bedeutungslos zu erachten.

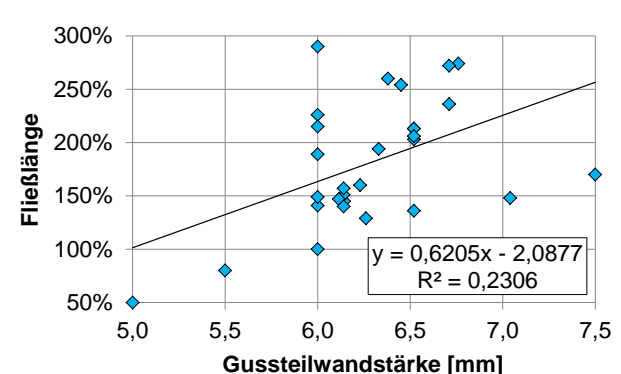
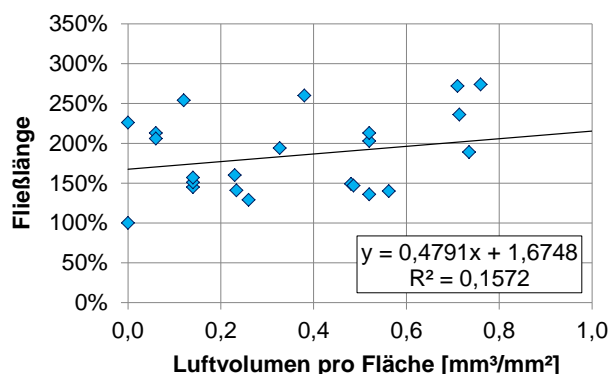
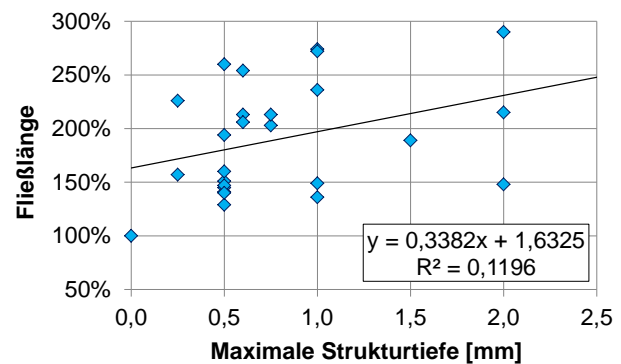
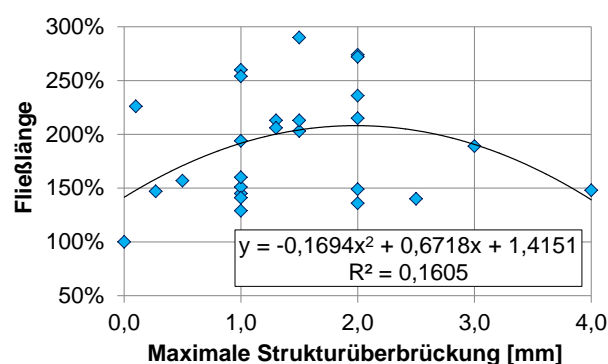
7 Strukturverbesserung

7.1 Einflussanalyse von Strukturmerkmalen

Die gewonnenen Kenntnisse über die Wirkmechanismen der Oberflächenstrukturen im Schwerkraft-Kokillengießen wurden genutzt, um eine verbesserte Oberflächenstruktur zu entwickeln. Diese sollte die bisher untersuchten Strukturen im Bereich Fließ- und Formfülllänge unter der Wahrung des Leichtbauaspektes übertreffen.

In den folgenden sechs Diagrammen ist jeweils die Fließlänge über ein entsprechendes Strukturmerkmal der 24 untersuchten Oberflächenstrukturen aufgetragen. Die analysierten Strukturmerkmale waren das Luftvolumen pro Fläche [mm³/mm²], die maximale Strukturüberbrückung [mm], die Kontaktfläche pro Fläche [mm²/mm²], die Wandstärke während der Füllung [mm], die maximale Strukturtiefe [mm] und die Anströmrichtung der Struktur [°].

Die sich überlagernden Wirkmechanismen der Oberflächenstrukturen konnten nicht getrennt voneinander betrachtet werden. Hieraus resultierte eine Streuung der Ergebnisse und es ergaben sich teilweise geringe Bestimmtheitsmaße (R²). Dennoch war es möglich, entsprechende Tendenzen zu erkennen, zielführende Struktureigenschaften abzuleiten und diese für die Entwicklung einer verbesserten Oberflächenstruktur zu nutzen.



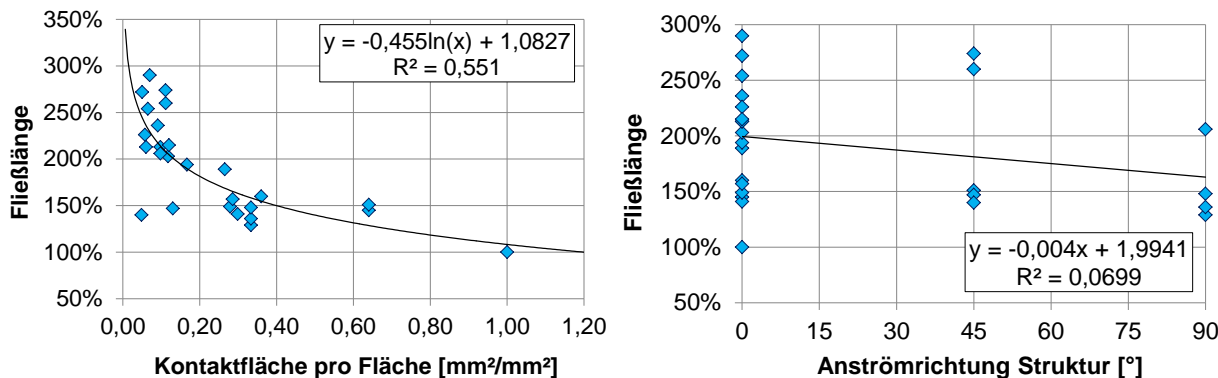


Bild 7.1: Experimentell ermittelte Fließlängen in Abhängigkeit von den Strukturmerkmalen

Maximale Strukturüberbrückung [mm]

In dem Diagramm oben links liegt das Maximum der Fließlänge bei der Polynomfunktion 2. Grades bei ca. 2,0 mm. Es ist aus den durchgeführten Untersuchungen bekannt, dass Strukturen mit einer Breite von 2,0 mm bis 3,0 mm von der Schmelze im horizontalen Guss überströmt werden können.

maximale Strukturtiefe [mm]

Für die Strukturtiefe ergibt sich in erster Näherung ein linearer Zusammenhang mit einem Anstieg von $n = 0,43$. Entsprechend sollte eine Oberflächenstruktur möglichst tief ausgelegt werden.

Luftvolumen pro Fläche [mm³/mm²]

Das Luftvolumen ist abhängig von der Strukturüberbrückung und der Strukturtiefe. Umso größer das Luftvolumen ist, welches sich zwischen Schmelze und Kokillenoberfläche ausbildet, umso größer ist tendenziell die erreichte Fließlänge. Der Anstieg der Geraden in erster Näherung beträgt $n = 0,5$, sodass von einem wichtigen Einfluss ausgegangen werden kann. Das Vorhandensein eines Luftspaltes ist zwingend zur Wärmeisolation erforderlich, jedoch nimmt die Dicke eine untergeordnete Rolle ein.

Kontaktfläche pro Fläche [mm²/mm²]

In dem Diagramm in der Mitte rechts erkennt man anhand der logarithmischen Funktion den starken Einfluss der Kontaktfläche auf die Fließlänge. Hierbei steigt mit Abnahme der Kontaktfläche die Fließlänge überproportional, regressiv an.

Gussteilwandstärke während der Füllung [mm]

Die Wandstärke, bzw. die Querschnittsfläche, die mit Schmelze durchströmt werden kann, übt in erster Näherung einen linearen Einfluss auf die Fließlänge aus ($n = 0,43$). Jedoch steigt mit der Gussteilwandstärke auch das Volumen und somit die Gussteilmasse. Eine Vergrößerung der Wandstärke zur Verbesserung der Fließlänge wäre somit ein Widerspruch zu den definierten Zielen.

Anströmrichtung der Struktur [°]

Der Anströmrichtung der Strukturen durch die Schmelze konnte kein signifikanter Einfluss auf die Fließlänge nachgewiesen werden und wird somit als vernachlässigbar angesehen.

Anhand der Diagramme lassen sich die zwei wichtigsten Strukturmerkmale ableiten, welche die Fließlänge maßgeblich bestimmen. Das sind zum einen die Kontaktfläche und das wärmeisolierende Luftvolumen, welches sich zwischen der Schmelze und der Kokille ausbildet.

7.2 Mathematische Berechnung der Fließlänge

Zum Nachweis der Beeinflussung der Fließlänge durch die Kontaktfläche und den Luftspalt wurde der Gesamt-Wärmedurchlasswiderstand R_{Gesamt} durch einen oberflächennahen Bereich der Kokille für alle Oberflächenstrukturen berechnet. Bild 7.2 visualisiert einen Ausschnitt zwischen der Schmelze und einer oberflächenstrukturierten Kokille. Links ist die Aufsummierung der resultierenden thermischen Einzelwiderstände, welche sich aus den drei Kontaktpartnern, Schmelze, Luft und Kokille ergeben, dargestellt. Dies sind:

- $R_{Schmelze}$ - Wärmedurchlasswiderstand durch die Schmelze
- $R_{Schmelze/Oxid}$ - Wärmeübergangswiderstand zwischen der Schmelze und der Oxidhaut
- R_{Oxid} - Wärmedurchlasswiderstand durch die Oxidhaut
- $R_{Oxid/Luftspalt}$ - Wärmeübergangswiderstand zwischen der Oxidhaut und dem Luftspalt
- $R_{Luftspalt}$ - Wärmedurchlasswiderstand des Luftspaltes
- $R_{Struktur+Luft}$ - Wärmedurchlasswiderstand durch die Struktur und das Luftvolumen
- $R_{Kokille}$ - Wärmedurchlasswiderstand durch den oberflächennahen Bereich der Kokille

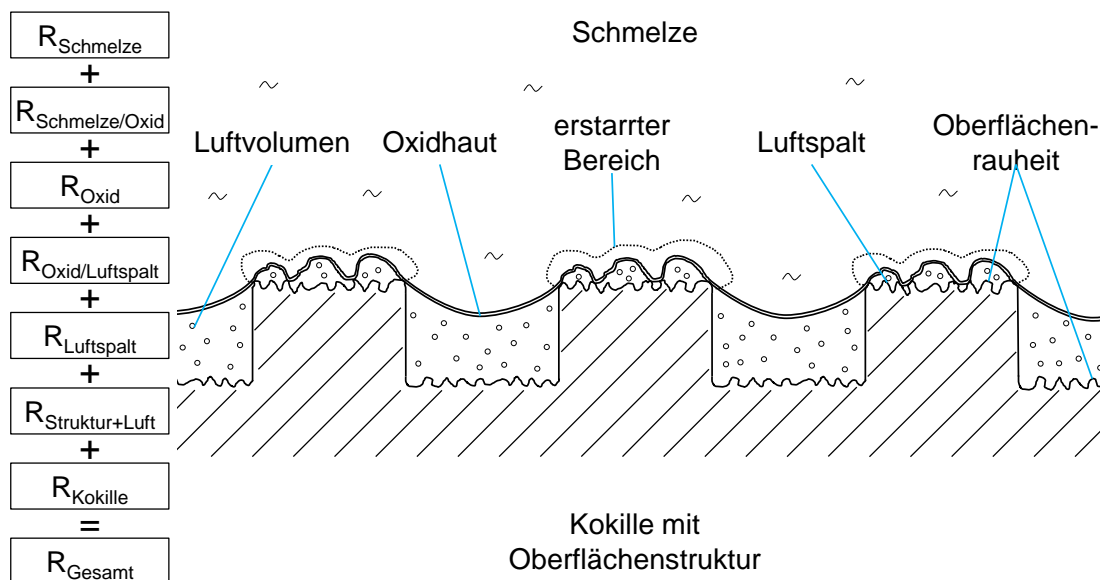


Bild 7.2: Visualisierung einer mit Schmelze benetzten, oberflächenstrukturierten Kokille

Der Gesamt-Wärmedurchlasswiderstand R_{Gesamt} soll in erster Näherung durch eine entsprechende Vereinfachung berechnet werden. Vernachlässigt werden $R_{Schmelze}$ aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit, $R_{Schmelze/Oxid}$ wegen der optimalen Verbindung zwischen der Schmelze und der Oxidhaut, R_{Oxid} und $R_{Oxid/Luftspalt}$ aufgrund der geringen Oxidhautdicke von ca. 1 μm . $R_{Luftspalt}$ wurde ebenfalls für die glatte Oberfläche und alle gefrästen Oberflächenstrukturen vernachlässigt. Diese Oberflächen wurden bei den Berechnungen als ideal glatt angenommen. Die gelaserten Oberflächenstrukturen wiesen eine deutlich höhere Oberflächenrauheit ($R_z \approx 50 \mu\text{m}$) auf. $R_{Luftspalt}$ wurde bei diesen Strukturen entsprechend vereinfacht und durch den Ausdruck $0,5 \cdot A_{Struktur}$ rechnerisch berücksichtigt. Die definierten Vereinfachungen und Randbedingungen zur Berechnung des Gesamt-Wärmedurchlasswiderstandes R_{Gesamt} können Bild 7.3 entnommen werden.

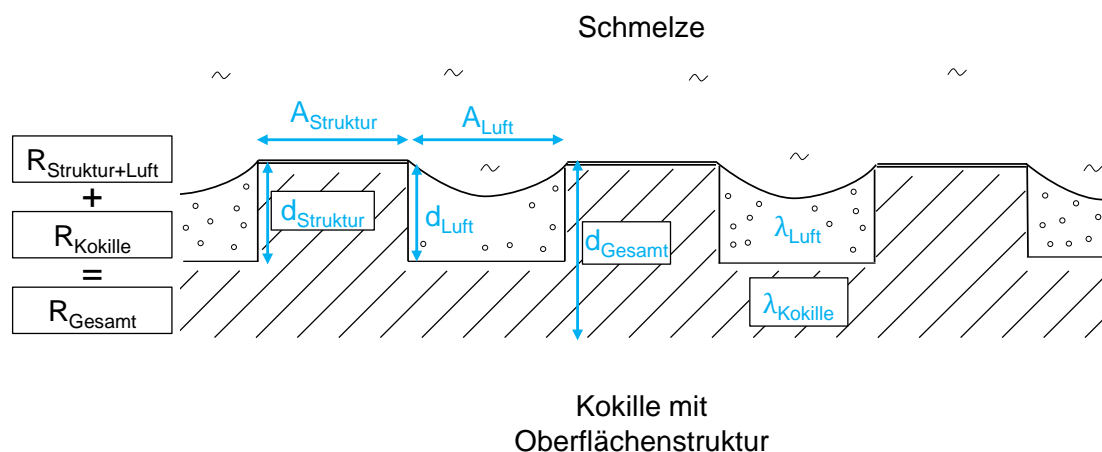


Bild 7.3: Annahmen zur Berechnung des Gesamt-Wärmedurchlasswiderstandes R_{Gesamt}

Die Festlegung der Gesamtdicke $d_{Gesamt} = 10 \text{ mm}$ des betrachteten, oberflächennahen Bereiches der Kokille erfolgte aus der Abschätzung der Wärmeeindringtiefe τ nach rund 2 s zu:

$$\tau = 2 \cdot \sqrt{\alpha \cdot t} \quad (7.1)$$

[174]

R_{Gesamt} setzt sich vereinfacht aus dem Wärmedurchlasswiderstand der Kokille $R_{Kokille}$ und dem Wärmedurchlasswiderstand der Struktur-Luft-Kombination $R_{Struktur+Luft}$ zusammen:

$$R_{Gesamt} = R_{Kokille} + R_{Struktur+Luft} \quad (7.2)$$

Der Wärmedurchlasswiderstand $R_{Kokille}$ lässt sich aus dem Verhältnis der Dicke der Kokille $d_{Kokille}$ zur entsprechenden Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{Kokille}$ berechnen:

$$R_{Gesamt} = \frac{d_{Kokille}}{\lambda_{Kokille}} + \frac{1}{u_{Struktur+Luft}} \quad (7.3)$$

Die Struktur der Kokillenoberfläche wurde als sogenannte Wärmebrücke betrachtet. Diese weist einen deutlich kleineren Wärmedurchlasswiderstand auf, als die angrenzenden, wärmeisolierenden Bereiche, die mit Luft gefüllt sind. Somit resultiert durch die Struktur ein größerer, lokaler Wärmestrom. Zur Berücksichtigung der strukturabhängigen Wärmebrücken wurden die Oberflächenverhältnisse $A_{Struktur}/A_{Gesamt}$ (Struktur pro Fläche) und A_{Luft}/A_{Gesamt} (Luft pro Fläche) herangezogen:

$$R_{Gesamt} = \frac{d_{Kokille}}{\lambda_{Kokille}} + \frac{1}{u_{Struktur} \cdot \frac{A_{Struktur}}{A_{Gesamt}} + u_{Luft} \cdot \frac{A_{Luft}}{A_{Gesamt}}} \quad (7.4)$$

Die Wärmedurchlasskoeffizienten $u_{Struktur}$ und u_{Luft} wurden durch die entsprechenden Dicken der Luftschicht d_{Luft} und der Struktur $d_{Struktur}$ sowie deren Wärmeleitfähigkeiten λ_{Luft} und $\lambda_{Kokille}$ ausgedrückt:

$$R_{Gesamt} = \frac{d_{Kokille}}{\lambda_{Kokille}} + \frac{1}{\frac{\lambda_{Kokille}}{d_{Struktur}} \cdot \frac{A_{Struktur}}{A_{Gesamt}} + \frac{\lambda_{Luft}}{d_{Luft}} \cdot \frac{A_{Luft}}{A_{Gesamt}}} \quad (7.5)$$

Aus dem Kehrwert des Gesamt-Wärmedurchlasswiderstandes R_{Gesamt} ergibt sich der Gesamt-Wärmedurchlasskoeffizient u_{Gesamt} durch einen 10 mm dicken, oberflächennahen Bereich der Kokille unter Berücksichtigung einer vorhandenen Oberflächenstruktur mit dazwischenliegenden Luftvolumen:

$$u_{Gesamt} = \frac{1}{R_{Gesamt}} \quad (7.6)$$

Eine Gegenüberstellung der errechneten, strukturabhängigen Gesamt-Wärmedurchlasskoeffizienten u_{Gesamt} mit den experimentell ermittelten Fließlängen ist in Bild 7.4 dargestellt. Man erkennt die gute Übereinstimmung. Dieser Zusammenhang lässt sich in erster Näherung mit der folgenden logarithmischen Funktion beschreiben:

$$y = -1,259 \ln(x) + 11,499$$

bzw.

$$FL = -1,259 \ln(u_{Gesamt}) + 11,499 \text{ [%]} \quad (7.7)$$

Der Kurvenverlauf resultiert aus der logarithmischen Abhängigkeit des Gesamt-Wärmedurchlasskoeffizienten von der effektiven Kontaktfläche. Durch die Kombination der Kontaktfläche mit dem strukturabhängigen Luftvolumen wird der Anstieg der Funktion gedämpft. Die Datengrundlage zur Berechnung des strukturabhängigen Gesamt-Wärmedurchlasskoeffizienten kann Anhang U entnommen werden.

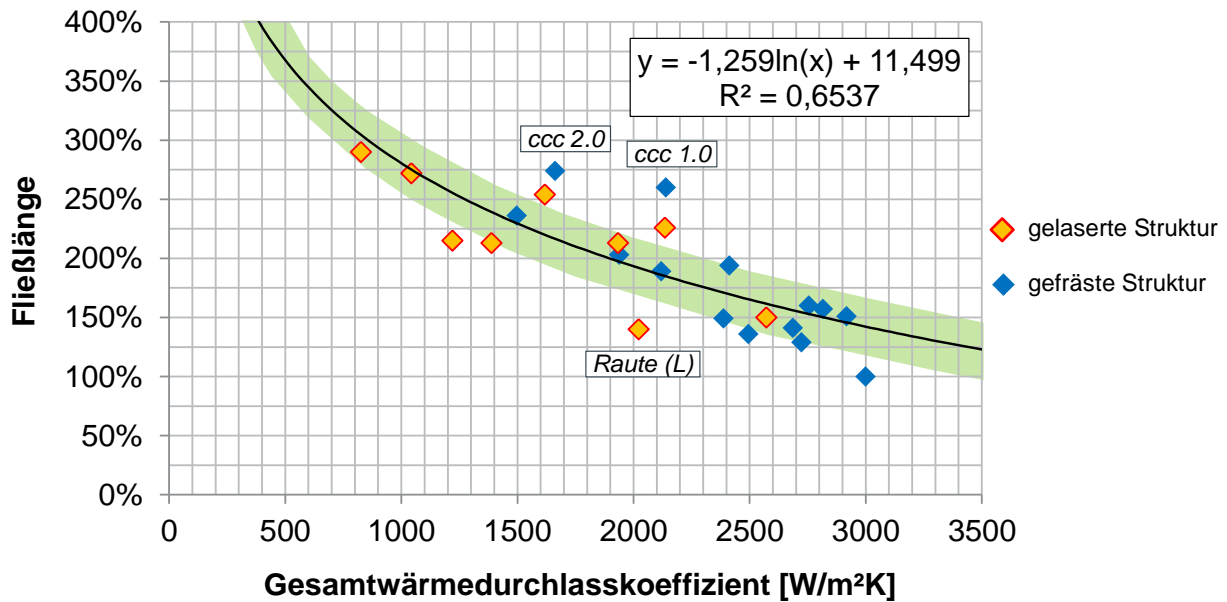


Bild 7.4: Fließlängen über errechnete, strukturabhängige Gesamt-Wärmedurchlasskoeffizienten

Das Bestimmtheitsmaß R^2 beträgt für alle betrachteten Strukturen 0,65. Auf die logarithmische Funktion bezogen, ergaben sich für die gefrästen bzw. gelaserten Strukturen Bestimmtheitsmaße von 0,60 bzw. 0,58. Der grüne Bereich kennzeichnet die Abweichung der Fließlänge von der logarithmischen Funktion in einem Bereich von $\pm 25\%$. Ausreißer bildeten die gefrästen Strukturen *ccc 1.0* und *ccc 2.0* sowie die gelaserte Struktur *Raute (L)*. Die entsprechenden Abweichungen von der logarithmischen Funktion können aus den getroffenen Annahmen, der vereinfachten Abschätzung der Oberflächenrauheit bzw. aus den Ungenauigkeiten der experimentellen Gießversuche resultieren. Nachfolgend eine gewichtete Auflistung der potenziellen Fehlerquellen:

| Experimentelle Abweichung unten ↓ bzw. oben ↑ | Rechnerische Abweichung links ← bzw. rechts → |
|---|--|
| 1. Strukturabhängige Gussteilwandstärke bzw. Gießkanalquerschnitt | 1. Abschätzung Oberflächenrauheit (ideal glatt bzw. $0,5 \cdot A_{Struktur}$) |
| 2. Oberflächenrauheiten der gefrästen und der gelaserten Strukturen | 2. Abschätzung Kontaktfläche $A_{Struktur}$ während der Füllung |
| 3. Ungenauigkeiten im Gießversuch (Temperatur, Geschwindigkeit) | 3. Abschätzung des Luftvolumens während der Füllung ($A_{Luft}; d_{Luft}$) |

7.3 Ableitung einer Struktur

Ausgehend aus den gewonnenen Erkenntnissen und der Möglichkeit zur theoretischen Berechnung der Fließlänge anhand des strukturabhängigen Gesamt-Wärmedurchlasskoeffizienten wurde eine neue Struktur, genannt *Carbon*, entwickelt. Diese besaß folgende Merkmale:

- Kontaktfläche pro Fläche: 0,14 mm²/mm²
- Luftvolumen: 1,5 mm³/mm²
- Strukturüberbrückung: 1,5 mm
- Strukturtiefe: 2,0 mm
- Gussteilwandstärke: 6,0 mm
- Anströmung: unabhängig
- Geschlossenes Strukturnetzwerk

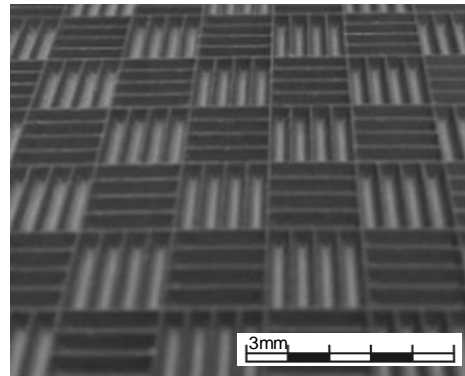


Bild 7.5: Oberflächenstruktur *Carbon*

Die gelaserte Oberflächenstruktur *Carbon* ist in Bild 7.5 dargestellt. Untersuchungen zur Herstellbarkeit der Struktur *Carbon* per Laserstrahl können Anhang V entnommen werden. Anhand der Berechnung des Gesamt-Wärmedurchlasskoeffizienten ergab sich eine Steigerung der Fließlänge von ca. +200 % im Vergleich zu einer glatten Oberfläche, ohne Zunahme der Gussteilwandstärke.

Die schachbrettartige Anordnung der Vertiefungen stellte sicher, dass das Luftvolumen von der Schmelze eingeschlossen wurde und nicht entweichen konnte. Durch das Erwärmen und Ausdehnen der eingeschlossenen Luft auf annähernd Schmelztemperatur wurde gewährleistet, dass die Strukturen auch am Ende der Formfüllung durch den wirkenden metallostatistischen Druck nicht gefüllt wurden. Eine Gussteilvolumenzunahme konnte entsprechend vermieden werden.

Die theoretische Berechnung der Fließlänge konnte durch Gießversuche bestätigt werden. Es wurde eine Steigerung der Fließlänge von +190 %, im Vergleich zu einer glatten Oberfläche, erreicht, vgl. Bild 5.7. Die Zunahme des Gussteilvolumens konnte vernachlässigt werden, da die Schmelze nur zu 5 % in die Strukturvertiefungen eindrang. Ein hergestelltes Gussteil mit der Struktur *Carbon* ist in Bild 7.6 dargestellt.

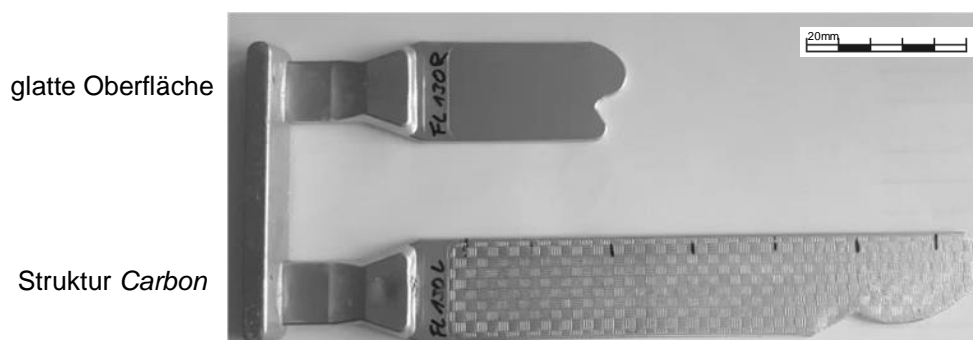


Bild 7.6: Gussteil mit einer Fließlängensteigerung von +190 % im Vergleich zu einer glatten Oberfläche

8 Diskussion und Beurteilung der Ergebnisse

8.1 Simulation

Unter Zuhilfenahme der kommerziellen Software Flow 3D der Fa. Flow Science wurden insgesamt drei vereinfachte Berechnungsmodelle aufgebaut und vergleichende Untersuchungen bezüglich der Oberflächenstrukturen und deren Einfluss auf das Fließen und Erstarren einer AlSi11Mg-Legierung durchgeführt.

Das erste Berechnungsmodell *Fließlänge* wurde zur Fließlängen-Potenzialanalyse von 25 Oberflächenstrukturen im Vergleich mit einer glatten Oberfläche aufgebaut (Kapitel 5.1). Ziel war es, mit diesem Modell erste Erkenntnisse zum Fließlängenpotenzial zu identifizieren und mögliche Wirkmechanismen abzuleiten. Hierbei stellte sich heraus, dass trotz der zahlreichen Vereinfachungen, wie vernachlässigtes Anschnittsystem, einfache Kavitätsgeometrie, konstante Stoffeigenschaften, eine niedrige Schmelzetemperatur sowie modellbegrenzende Ebenen mit konstanter Wandtemperatur, die Ergebnisse sehr aussagekräftig waren. Keine untersuchte Oberflächenstruktur verschlechterte die Fließlänge im Vergleich zu einer glatten Oberfläche. Die Schmelze konnte unter den definierten Prozessgrenzen im gewissen Grenzen die Oberflächenstrukturen überströmen. Hierdurch wurde die Kontaktfläche reduziert und es bildete sich ein wärmeisolierender „Luftspalt“ aus. Die Formfüllcharakteristik konnte im Vergleich zur Realität mit einer guten Übereinstimmung wiedergegeben werden. Die größten Abweichungen zur Realität traten bei den Strukturen *ccc 1.0*, *ccc 2.0*, *L-Rille 1,5 mm*, und *L-Rille 2,0 mm* auf. Eine Optimierung der Randbedingung Einströmungsgeschwindigkeit könnte durch die Vorgabe eines konstanten Gießdruckes Abhilfe schaffen. Im Berechnungsmodell *Fließlänge* wurden etwaige Rauheiten bei den Oberflächenstrukturen, nur vereinfacht über eine zusätzliche Reduzierung der Kontaktfläche beschrieben. Die getätigte Annahme bei allen gelaserten Strukturen von $A_{AKontakt} = 0,25$ gilt zu hinterfragen und in weiteren Untersuchungen zu konkretisieren. Diese Vereinfachung spiegelte sich bei der Ergebnisgenauigkeit der laserstrukturierten Oberflächen wider. Aufgrund dieser vorgenommenen Vereinfachung beim Berechnungsmodell *Fließlänge* ergaben sich unter anderem deutliche Differenzen zwischen den numerischen und experimentellen Ergebnissen. Exakte Ergebnisübereinstimmungen bildeten die Ausnahme. Dennoch konnten entsprechende Fließlängentendenzen, zum Beispiel durch eine Größenskalierung der Oberflächenstruktur, in den numerischen Untersuchungen nachgewiesen werden. Fortführende Untersuchungen sollten eine realitätsnahe Erweiterung des Berechnungsmodells *Fließlänge* als Ziel haben. Des Weiteren wird empfohlen, alle temperaturabhängigen Stoffeigenschaften kokillen- und legierungsseitig zu berücksichtigen. Dies sollte jedoch immer unter Beachtung der Verhältnismäßigkeit bezüglich des steigenden Rechenaufwandes abgewogen werden.

Das Berechnungsmodell *Fließlänge* mit glatten Oberflächen wurde ebenfalls für die Einflussanalyse einer Oberflächenoxidhaut auf die Fließlänge genutzt (Kapitel 6.3.1). Hierbei wurde die vereinfachte Annahme des sogenannten Oberflächenparameters durch Variation des Simulationsparameters

„Oberflächenspannung“ getroffen. Hierbei repräsentierte ein geringer Oberflächenparameter ($< 0,9 \text{ N/m}$), dass die Oxidhaut optimal „aufgerissen“ und somit der Strömungswiderstand an der Schmelzefront signifikant reduziert wurde. Ein hoher Oberflächenparameter ($> 0,9 \text{ N/m}$) induzierte hingegen einen erhöhten Strömungswiderstand, da die Oxidhaut auf der Schmelzeoberfläche nicht „aufgerissen“ wurde. Bei Gussteilwandstärken von $6,0 \text{ mm}$ und Strömungsgeschwindigkeit von $< 0,1 \text{ m/s}$ wurde nur ein sehr geringes Potenzial zur Steigerung der Fließlänge erkannt ($< 10 \%$). Die Untersuchungsergebnisse deckten sich im hohen Maße mit den durchgeführten experimentellen Untersuchungen sowie den vorhandenen Erfahrungen aus dem Stand der Technik. Da Oxidhäute beim Aluminiumgießen ein qualitätsbestimmendes Merkmal bilden, sollten hier weiterführende Untersuchungen durchgeführt und entsprechende Erweiterungen in kommerziellen Simulationstools angestrebt werden. Als zielführend werden die Berücksichtigung der Oxidhautbildung bei Luftkontakt, die zeitabhängige Oxidhautfestigkeit sowie der Transport in das spätere Gussteil erachtet.

Eine Erweiterung des Berechnungsmodelles *Fließlänge* bildete das Modell *Durchströmung* (Kapitel 6.1). Hierbei wurden die zwei begrenzenden z-Ebenen (z-min und z-max) durch endliche Kokillensäulen ersetzt. Ziel war ein quasistationärer Temperaturzustand zwischen der stetig nachströmenden Schmelze und der oberflächenstrukturierten Kokille. Die Analyse der Wärmestroms \dot{Q} in der Kokille im quasistationären Zustand ermöglichte eine erste Abschätzung der Wärmeisolationseigenschaften der Oberflächenstrukturen während der Formfüllung sowie Rückschlüsse auf ein mögliches Fließlängensteigerungspotenzial. Die ermittelten Unterschiede der strukturabhängigen Wärmeströme waren gering. Diese lagen im Vergleich zu einer glatten Oberfläche im niedrigen einstelligen Prozentbereich und waren somit schwer interpretierbar. Dennoch zeigte sich bei der Gegenüberstellung mit den ermittelten, strukturabhängigen Fließlängen ein nachweisbarer Zusammenhang. Dieser besagte, dass eine geringe Verringerung des Wärmestroms in die Kokille das Fließlängenpotenzial logarithmisch steigert. Fortführende Untersuchungen sollten eine Validierung der numerischen Ergebnisse mit experimentellen Durchströmversuchen als Ziel haben.

Das Berechnungsmodell *Erstarrung* zeichnete sich durch einen einfachen Aufbau mit zahlreichen Vereinfachungen und Randbedingungen aus und ermöglichte in kurzer Zeit eine Aussage über die strukturabhängigen Erstarrungsdauern bei verschiedenen Gussteilwandstärken (Kapitel 6.2.1). Ausgangsbasis bildeten ein kleiner Oberflächenausschnitt der Kokille mit Struktur und ein definiertes Schmelzevolumen. Die festgelegten Randbedingungen und Vereinfachungen bedingten ein hohes Fehlerpotenzial, da Formfüllung, Schwindung, Konvektion und temperaturabhängige Stoffeigenschaften nicht berücksichtigt wurden. Dennoch konnte mit den Untersuchungen gezeigt werden, dass ein theoretisches Potenzial zur Verkürzung der Erstarrungsdauer durch eine Oberflächenstruktur vorhanden war, speziell bei zunehmenden Gussteilwandstärken ($> 10 \text{ mm}$). Die Validierung zwischen den numerisch ermittelten Erstarrungsdauern und den gemessenen λ_2 -Werten an realen Gussteilen zeigten eine gute Übereinstimmung.

8.2 Experiment

Die Gießversuche mit der modularen Kokille ermöglichten die schnelle und kosteneffiziente Untersuchung strukturabhängiger Einflussgrößen auf die Fließ- und Formfülllänge einer Aluminiumschmelze, im direkten Vergleich mit einer glatten Oberfläche (Kapitel 5.2). Nur durch den gezielten Einsatz einer Oberflächenstruktur konnte die Fließlänge um +190 % (Struktur *Carbon*) und die Formfülllänge um bis zu +250 % (Struktur *ccc 2.0*) gesteigert werden. Jedoch sollte bei der Verwendung der modularen Kokille beachtet werden, dass der direkte Vergleich zweier Kavitäten eine gegenseitige Beeinflussung der Druckverhältnisse bedingt. Erfolgt in der Referenzkavität mit der glatten Oberfläche ein Abfall der Strömungsgeschwindigkeit durch die einsetzende Erstarrung, resultiert in der Untersuchungskavität mit strukturierter Oberfläche ein entsprechender Anstieg der Strömungsgeschwindigkeit, wodurch die Fließ- und Formfülllänge proportional zunimmt. Die ermittelten, strukturabhängigen Fließ- und Formfülllängen beziehen sich stets auf den direkten Vergleich mit einer glatten Oberfläche. Es kann somit kein strukturübergreifender, direkter Quervergleich gezogen werden. Hierfür bedarf es weiterer Untersuchungen. Die nachfolgende Erläuterung soll dies verdeutlichen:

- Struktur *Carbon* vs. glatte Oberfläche → Fließlänge: + **190 %** ✓
- Struktur *Haifisch grob* vs. glatte Oberfläche → Fließlänge: + **113 %** ✓
- Struktur *Carbon* vs. Struktur *Haifisch grob* → Fließlänge: + **77 %** ⚡

Die Gießversuche wurden stets ohne Schlichte durchgeführt. Hierdurch wurden die Störeinflüsse der Schlichte, wie Rauheit, Schlichtedicke, Schlichtezusammensetzung und der kontinuierliche Schlichteabtrag eliminiert. Durch die Verwendung geschichteter Oberflächenstrukturen ist mit einer Reduzierung der Fließlängensteigerungen zu rechnen, was Gierth [94] in seinen Untersuchungen nachweisen konnte.

Die durchgeführten Thermographie- und Hochgeschwindigkeitsaufnahmen ermöglichten einen Blick in die Kavität während der Formfüllung mit dem Fokus auf die Füllcharakteristik von Oberflächenstrukturen (Kapitel 6.1.2.1). Hierbei wurden drei Oberflächenstrukturen und drei Strömungsgeschwindigkeiten analysiert. Die Thermographieaufnahmen machten durch auftretende Strahlungseffekte, speziell bei sehr feinen Strukturen eine Interpretation der Füllcharakteristik schwierig und boten viel Spielraum für Vermutungen. Die Hochgeschwindigkeitsaufnahmen im Gegenlicht erwiesen sich als sehr aussagekräftige Untersuchungsmethodik. Es wurde deutlich, dass Oberflächenstrukturen mit einer Strukturbreite von 2,0 mm durch die Schmelze, unabhängig von der Strömungsgeschwindigkeit, überströmt werden konnten. Die Füllung der Strukturen erfolgte durch die Wirkung des metallostatistischen Druckes am Ende der Formfüllung. Die Füllcharakteristiken der drei untersuchten Strukturen deckten sich im hohen Maße mit den Erkenntnissen aus den numerischen Untersuchungen. Weiterführende Gießversuche sollten eine Formfüllung im steigenden Guss in Betracht ziehen.

Die Gießversuche mit reduziertem metallostatischen Druck wurden genutzt, um die Erkenntnisse zur Füllcharakteristik aus den Thermographie- und Hochgeschwindigkeitsaufnahmen auf die verbleibenden Oberflächenstrukturen auszuweiten (Kapitel 6.1.2.3). Als Bewertungskriterium diente das Strukturabbildungsvermögen [%] welches sich aus der Gussteilwandstärke von 6,0 mm und dem Füllgrad [%] der Oberflächenstrukturen ergab. Die modulare Kokille ermöglichte nur die Ermittlung des druckabhängigen Strukturabbildungsvermögens bei zwei verschiedenen Druckniveaus am Ende der Formfüllung (240 Pa und 2.100 Pa). Das experimentell ermittelte Strukturabbildungsvermögen zeigte bei beiden Druckniveaus eine gute Übereinstimmung mit dem theoretisch berechneten Strukturabbildungsvermögen nach Laplace. Die Ermittlung des Füllgrades der Strukturen war sehr anfällig gegenüber Messfehlern und teilweise geprägt von Vorerstarrungseffekten. Für weiterführende Untersuchungen wird die Analyse weiterer Druckniveaus empfohlen, um den hier verwendeten Berechnungsansatz nach Laplace zur Bestimmung des Strukturabbildungsvermögens weiter zu validieren. Als geeigneter Versuchsaufbau wird der steigende Guss, zum Beispiel in Anlehnung an die Bolzenprobe, empfohlen. Hierdurch können nach jedem Anguss mehrere Druckniveaus und der Einfluss auf das Strukturabbildungsvermögen ausgewertet werden.

Zur Analyse des Wirkmechanismus Wärmeabfuhr wurden mit ausgewählten Oberflächenstrukturen Gussteile hergestellt und anschließend metallographische Untersuchungen über den Gussteilquerschnitt von 6,0 mm durchgeführt (Kapitel 6.2.2). Eine Gegenüberstellung der numerischen und experimentellen Ergebnisse zeigte eine gute Übereinstimmung des λ_2 -Wertes in der Gussteilmitte der 14 untersuchten Oberflächenstrukturen. Als mögliche Fehlerquelle kann das Strukturabbildungsvermögen genannt werden. Bedingt durch den Versuchsaufbau betrug der maximale metallostatische Druck am Ende der Formfüllung 2.100 Pa. Wie aus vorangegangenen Untersuchungen deutlich wurde, werden bei diesem Druck einige Strukturen nicht zu 100 % abgebildet. Hierdurch verbleibt ein geringer Luftspalt mit wärmeisolierender Wirkung zwischen Schmelze und Kokille, wodurch die Erstarrungsdauern strukturabhängig verlängert wurden. Für weiterführende Untersuchungen auf diesem Gebiet wird empfohlen, mit einem deutlich höheren Druckniveau am Ende der Formfüllung zu arbeiten, um eine 100 %ige Strukturabbildung zu erzielen. Ebenso sollten weitere Strukturen sowie der Einfluss der Gussteilwandstärke untersucht werden. Dies würde eine Validierung mit den bereits vorhandenen, numerischen Untersuchungsergebnissen ermöglichen.

Die Einflussanalyse einer Oxidhaut auf der Schmelzoberfläche wurde nur in einem geringen Umfang durchgeführt. Jedoch zeigte sich bereits nach wenigen Abgüssen unter Argon-Atmosphäre, dass das mögliche Potenzial zur Steigerung der Fließlänge in schmalen Gießkanalquerschnitten von 6,0 mm und Strömungsgeschwindigkeiten von ca. 0,1 m/s mit ca. +7 % sehr gering war (Kapitel 5.1). Das Ergebnis deckte sich mit den Erfahrungen aus dem Stand der Technik für das Kokillengießen sowie den durchgeführten numerischen Untersuchungen. Kritisch zu hinterfragen war die jeweilige Atmosphärenzusammensetzung vor jedem Abguss. Eine Messung der Argon-Konzentration in der Kavität erfolgte nicht. Zur vermeintlichen Erreichung der nötigen 20 vol% Argonkonzentration wurde eine Kokillenabdichtung vorgesehen und vor jedem Abguss fünf Minuten mit reinem Argon gespült. Für fortführende Untersuchungen wird deshalb eine Messung der Argonkonzentration vor jedem Abguss

empfohlen. Ebenso sollten, wie in den numerischen Untersuchungen, weitere Strömungsgeschwindigkeiten analysiert werden.

Zur mathematischen Berechnung der Fließlänge wurde der Ansatz des Wärmedurchlasskoeffizienten u_{Gesamt} durch einen strukturierten, oberflächennahen Bereich einer Kokille gewählt (Kapitel 7.2). Hierbei wurde die Kontaktfläche zwischen Schmelze und Kokille und das strukturabhängige Luftvolumen berücksichtigt. Eine mögliche Fehlerquelle bei der mathematischen Berechnung war der Einfluss der Oberflächenrauheit, welche aus dem jeweiligen, verwendeten Fertigungsverfahren resultierte. Bei den laserstrukturierten Oberflächen wurde die Oberflächenrauheit bei der Kontaktfläche vereinfacht durch den Faktor $0,5 \cdot A_{Struktur}$ abgeschätzt. Die mathematische Herleitung ermöglichte die Abschätzung der Fließlänge [%] einer strukturierten Oberfläche im Vergleich zu einer glatten Oberfläche nach der Formel $FL = -1,259 \ln(u_{Gesamt}) + 11,499$ [%]. Unter Berücksichtigung den definierten Annahmen ist mit dieser Formel eine Beurteilung zukünftiger Oberflächenstrukturen möglich. Für weiterführende Arbeiten wird empfohlen, diesen mathematischen Ansatz auf geschichtete Oberflächen bzw. geschichtete Oberflächenstrukturen auszuweiten. Hierfür werden die Ermittlung des Wärmedurchlasskoeffizienten für die Schlichte $u_{Schlichte}$ und die Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten zwischen Schmelze und Schlichte $\alpha_{Schlichte}$ als sinnvoll erachtet. Nachfolgend wäre eine Abschätzung des Wärmedurchgangskoeffizienten k_{System} durch einen geschichteten, strukturierten, oberflächennahen Bereich einer Kokille möglich, vgl. Formel (8.1):

$$k_{System} = \alpha_{Schlichte} + u_{Schlichte} + u_{Gesamt} \quad (8.1)$$

9 Ableitung von Strukturempfehlungen

Die durchgeführten numerischen und experimentellen Untersuchungen zeigten, dass die Oberflächenstrukturen die Fließ- und Formfülllängen der Schmelze positiv beeinflussten. Der identifizierte Hauptwirkmechanismus Wärmeisolation wird primär durch folgende zwei Strukturmerkmale charakterisiert:

- Minimierung der Kontaktfläche zwischen Kokille und Schmelze
- Ausbildung eines Luftvolumens zwischen Kokille und Schmelze

Die Kontaktfläche war bei den durchgeführten Untersuchungen das dominierende Strukturmerkmal. Ziel einer jeden Oberflächenstruktur sollte sein, die Kontaktfläche zwischen Schmelze und Kokille so weit wie möglich zu reduzieren, um den Wärmestrom in die Kokille zu verringern. Strukturen, die sich hierfür eignen sind: *Waffel fein*, *ccc 1.0*, *L-Rillen 0,5 mm*, *L-Rille 1,0 mm* und *L-Rille 1,5 mm* und *Carbon*.

Das zweitwichtigste Strukturmerkmal für eine hohe Wärmeisolation ist die Ausbildung des Luftvolumens durch das Überströmen der Oberflächenstrukturen. Hierbei spielt die Dicke des Luftspaltes ($>0,2$ mm) eine untergeordnete Rolle. Entscheidend ist deren Ausbildung, wie anhand der Berechnungen des Gesamt-Wärmedurchlasswiderstandes in Kapitel 7 gezeigt wurde. Vorteile bieten hier die gelaserten Oberflächenstrukturen. Durch deren raue Oberflächentopographie wird stets ein dünner Luftspalt sichergestellt. Empfohlene Strukturen sind hier *Haifisch*, *Noppe (L)*, *Eagle Eye* und *Laser diffus*.

Zur Wahrung des Leichtbaugedankens sollte die Breite der Strukturen so ausgelegt werden, dass diese am Ende der Formfüllung, mit Einsetzen des metallostatistischen Druckes, nicht gefüllt werden. Für dieses Anwendungsgebiet eignen sich Strukturen ohne durchgängiges Strukturnetzwerk, wie *Golfball 1,0 mm*, *Golfball 2,0 mm* und *Golfball 3,0 mm*, *Eagle Eye* und *Carbon*.

Für Strukturen mit durchgängigem Strukturnetzwerk, wie *Waffel 45°*, *Waffel fein*, *ccc 1.0*, *ccc 2.0*, *L-Rillen*, *Noppe (L)* oder *Haifisch*, werden zur Abschätzung der idealen Strukturbreite die Berechnung des Laplace-Druckes empfohlen, vgl. Formel (4.14) in Kapitel 4.2.2.2. Hierdurch ist es möglich, die Strukturbreite anhand des wirkenden Druckes während des Füllens und am Ende der Formfüllung auszulegen. Das Diagramm in Bild 9.1 wird durch die Laplace-Druck-Gleichung in zwei Bereiche eingeteilt (grüne Linie). Bereich I: Füllung der Strukturen und Bereich II: Teilfüllung der Strukturen. Dies bedeutet, wenn der wirkende Druck während der Formfüllung den Laplace-Druck übersteigt, kommt es zwangsläufig zu einer Füllung der Oberflächenstrukturen. Die vier eingezeichneten horizontalen Linien kennzeichnen die vier Schmelzepegel von 10 mm, 90 mm, 300 mm und 500 mm mit den resultierenden, metallostatistischen Drücken am Ende der Formfüllung von 240 Pa, 2.100 Pa, 7.000 Pa und 12.000 Pa für das Schwerkraft-Kokillengießen. Die Gültigkeit dieses theoretischen Ansatzes wurde im Kapitel 6.1.2.3 nachgewiesen. Die Ergebnisse zeigten eine gute Übereinstimmung vom berechneten Laplace-Druck zu dem resultierenden Prozessdruck.

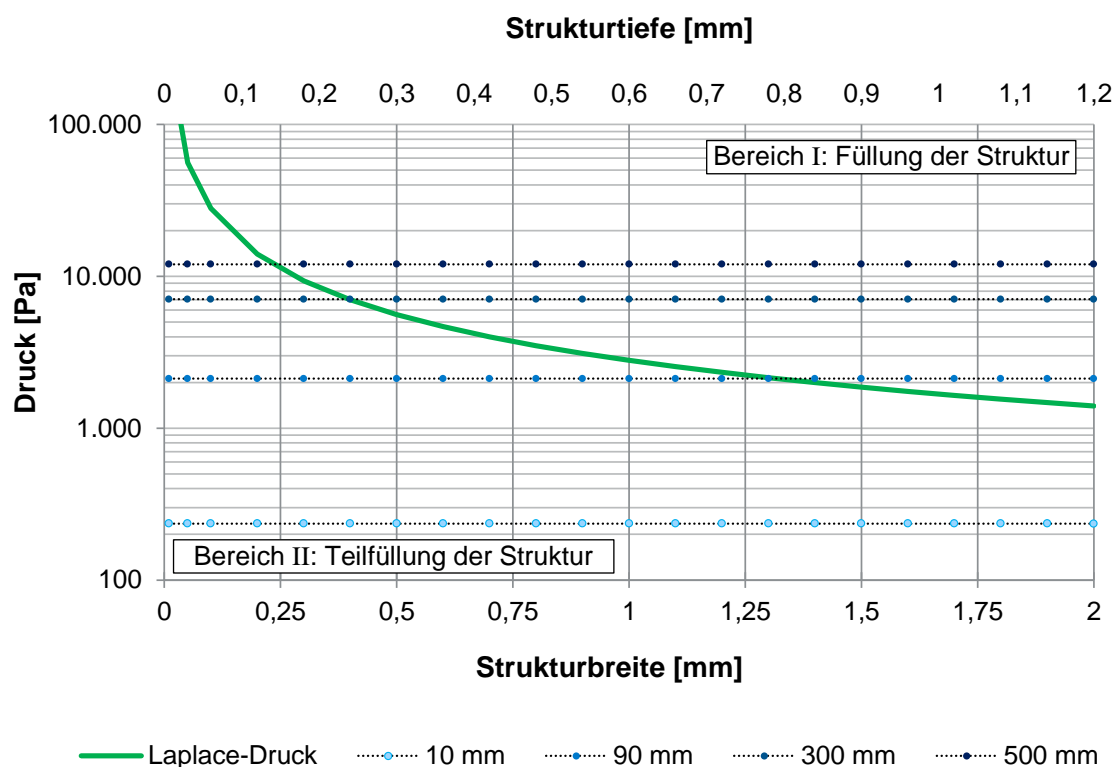


Bild 9.1: Theoretisches Strukturabbildungsvermögen nach Laplace in Abhängigkeit vom Druck

Bei der Strukturauslegung wird eine Strukturweite t von $t > b/2$ empfohlen. Diese Ableitung resultiert aus den Berechnungen zum Krümmungsradius einer Oberfläche während des Füllens einer Oberflächenstruktur. Der Laplace-Druck erreicht sein Maximum bei einem minimalen Krümmungsradius, entsprechend der halben Breite der Oberflächenstruktur. Um einen Kontakt zwischen Schmelze und Kokillenoberfläche zu vermeiden wird empfohlen $t > 1,2 \cdot b/2$ einzuhalten, vergleiche hierzu Bild 9.1. Die Strukturen, welche auf dem Prinzip der Minimierung des Krümmungsradius bei zunehmender Schmelzeindringtiefe abzielen, sind *Raute (L)*, *Noppe (L)* und *Haifisch klein* bzw. *Haifisch groß*.

Bei der theoretischen Abschätzung des Strukturabbildungsvermögens nach Laplace gilt zu bedenken, dass hier eine ideale Schmelze angenommen wird. Temperaturabhängige Werkstoffeigenschaften wie Viskosität, Dichte, Solidusanteil wurden nicht berücksichtigt. Vor allem der Einfluss der Oberflächenspannung in der Kombination mit der Oberflächenoxidhaut übt einen sehr starken Einfluss auf die Schmelzeindringtiefe bzw. auf das Strukturabbildungsvermögen aus. Wichtige Voraussetzung für den Gültigkeitsbereich der Laplace-Druck-Gleichung ist die Nicht-Benetbarkeit der Kokillenoberfläche mit einem resultierenden Kontaktwinkel zwischen Schmelze und Kokille von $> 120^\circ$.

Für Gussteilbereiche, in denen die Erstarrungsdauer gezielt verringert werden soll, bieten sich, wie in den experimentellen Untersuchungen gezeigt, die Strukturen *Waffel 45°* und *ccc 1.0 an*. Numerisch zeigte sich, dass ebenfalls die Strukturen *L-Rille 0,5 mm*, *L-Rille 1,0 mm* und *L-Rille 1,5 mm* ein geringes Potenzial besitzen. Prinzipiell muss sichergestellt werden, dass durch die Oberflächenstrukturierung die effektive Kontaktfläche zwischen Schmelze und Kokille, im Vergleich zu einer glatten Oberfläche, um mindestens +20 % erhöht wird. Des Weiteren ist es erforderlich, dass die Oberflächen-

strukturen durch die Schmelze 100 %ig abgebildet werden, um entsprechende Luftspalte mit wärmeisolierenden Eigenschaften zu vermeiden. Zu beachten gilt, dass die Gussteilvolumenzunahme bei einer gefüllten Oberflächenstruktur durch die vergrößerte, effektive Kontaktfläche kompensiert werden muss. In dünnwandigen Gussteilbereichen ($6,0 \text{ mm} < h_{Guss} < 10,0 \text{ mm}$) zeigten sich keine signifikanten Verbesserung. Entsprechend wird empfohlen eine Oberflächenstruktur bei Gussteilwandstärken von $h_{Guss} > 10 \text{ mm}$ einzusetzen. Zur gezielten Reduzierung der Erstarrungsdauer wird empfohlen, auf frästechnisch hergestellten Oberflächenstrukturen zurückzugreifen. Die lasertechnisch hergestellten Strukturen wie *Haifisch*, *Noppe (L)* und *Laser diffus* zeichnen sich durch eine prozessbedingte, hohe Oberflächenrauheit mit wärmeisolierenden Eigenschaften aus und eignen sich nicht, die Erstarrungsdauer gezielt zu reduzieren.

10 Zusammenfassung und Ausblick

Zentrale Leichtbauthemen konzentrieren sich heutzutage auf die Karosserie, den Antriebsstrang und auf das Fahrwerk. In diesen Bereichen setzt die Automobilbranche verstärkt auf Aluminiumbauteile, welche unter anderem durch das Fertigungsverfahren Gießen hergestellt werden. Verfahrens- und gussteilbedingt kommt zu einer Aufdickung der Gussteilwandstärke, um die Herstellbarkeit zu gewährleisten. Die Eliminierung dieser verfahrensbedingten Gussteilwandstärke, durch die Verbesserung der Fließ- und Formfülllänge, bietet ein bislang ungenutztes Potenzial zur Massereduzierung zukünftiger Gussbauteile. Eine weitverbreitete Möglichkeit die Fließ- und Formfülllänge von Aluminiumlegierungen in dünnwandigen, kaltlaufgefährdeten Gussteilbereichen zu verbessern, ist der Einsatz von Oberflächenstrukturen.

In der vorliegenden Arbeit wurden verschiedenste Strukturen und deren Einfluss auf die gießtechnologischen Eigenschaften untersucht. Strukturabhängig konnten Steigerungen der Fließ- und Formfülllänge von +190 % bzw. +250 % erzielt werden. Bei den strukturabhängigen Erstarrungsdauern zeigten sich hingegen keine signifikanten Reduzierungen bei Gussteilwandstärken von 6,0 mm. Bei Gussteilwandstärken von 14,0 mm ergaben sich leichte Tendenzen von bis zu -6 %.

In den Hauptuntersuchungen wurden die drei wahrscheinlichsten physikalischen Wirkmechanismen Wärmeisolation, Wärmeabfuhr und das Aufreißen der Oxidhaut analysiert. Es konnte gezeigt werden, dass die Wärmeisolation während der Formfüllung ein primärer Wirkmechanismus der Oberflächenstrukturen ist. Dieser ist abhängig von der Kontaktfläche zwischen der Schmelze und der Kokille und dem Luftvolumen in den Strukturvertiefungen. Eine Abschätzung der Fließlänge und der Wirksamkeit der Oberflächenstrukturen konnte durch die Berechnung des Gesamt-Wärmedurchlasskoeffizienten durch einen strukturierten, oberflächennahen Bereich der Kokille aufgezeigt werden.

Durch die gewonnenen Erkenntnisse und die nachweisliche Steigerung der Fließ- und Formfülllänge ist es nun möglich, die prozessbedingte Gussteilwandstärke im Schwerkraft-Kokillengießen signifikant zu reduzieren und einen weiteren Beitrag zum Leichtbau zu leisten. Die abgeleiteten Strukturempfehlungen dienen dem Gießer und Werkzeugbauer, um zukünftig wissensbasiert eine prozess- und anwendungsspezifische Strukturierung für Kokillenoberflächen vorzunehmen.

Zum Abschluss dieser Arbeit werden die anfangs aufgestellten Thesen aufgegriffen und verifiziert bzw. falsifiziert:

a) *Oberflächenstrukturen verbessern die Fließ- und Formfülllänge! Ja!*

Die numerischen und experimentellen Untersuchungen bestätigten, dass die Oberflächenstrukturen die Fließ- und Formfülllänge verbessern. Alle untersuchten Oberflächenstrukturen zeigten im direkten Vergleich mit einer glatten Oberfläche eine signifikante Steigerung. Das größte Potenzial zur Verbesserung der Fließ- und Formfülllänge, unter Berücksichtigung des Leichtbauaspektes, wurde durch die Struktur *Carbon* (+190 %) erzielt (Kapitel 5.3).

b) *Oberflächenstrukturen reduzieren signifikant die Erstarrungsdauer! Nein!*

Wie in den numerischen Untersuchungen gezeigt, war es tendenziell möglich die Erstarrungsdauer durch eine Oberflächenstruktur zu reduzieren (-6 %). Jedoch ist dieses Potenzial für die Praxis sehr gering. Es gilt, je dicker die Gussteilwandstärke, umso effektiver ist der Einsatz einer feinen Oberflächenstruktur, wie z. B. *Waffel 45°* oder *ccc 1.0*. Hierdurch ist in sehr engen Grenzen eine gezielte Erstarrungslenkung bzw. Reduzierung der Erstarrungsdauer möglich (Kapitel 6.3.3).

c) *Das Aufreißen der Oxidhaut von flüssigem Aluminium verbessert die Fließ- und Formfülllänge! Nein!*

Es konnte in ersten numerischen und experimentellen Untersuchungen gezeigt werden, dass ohne Vorhandensein einer Oxidhaut die Fließlänge um ca. 5 bis 10 % gesteigert werden kann. Dieses Fließlängenpotential ist gleichbedeutend mit dem idealen „Aufreißen“ der Oxidhaut durch eine Oberflächenstruktur. Da jedoch die Oxidationsgeschwindigkeit der Schmelze um ein vielfaches höher ist als die Strömungsgeschwindigkeit im Schwerkraft-Kokillengießen, ist dieses Potenzial zur Verbesserung der Fließ- und Formfülllänge als vernachlässigbar klein zu erachten (Kapitel 6.3.3).

d) *Richtungsabhängige Oberflächenstrukturen reduzieren den Strömungswiderstand! Nein!*

Voraussetzungen für die Reduzierung des Strömungswiderstandes sind eine turbulente Strömung und eine 100 %ige Benetzung der Oberflächenstruktur. Hierdurch dämpfen die Strukturspitzen die turbulente Grenzschichtströmung im Randbereich und diese Energieeinsparung kann zu einer Steigerung der Fließlänge beitragen. Beide zwingend erforderlichen Voraussetzungen waren bei den experimentellen Untersuchungen nicht gegeben. Die Strömungsgeschwindigkeiten in der modularen Kokille betragen ca. 0,1 bis 0,2 m/s. Hierbei kann von einer laminaren Strömung ausgegangen werden. Des Weiteren zeigten die experimentellen Untersuchungen, dass während des Formfüllvorganges die Oberflächenstrukturen überströmt werden und die nötige Strukturbenetzung von 100 % nicht erreicht wurde. Ein weiterer Beleg gegen diese These zeigten die numerischen und experimentellen Untersuchungen der Strukturen *Haifisch grob* und *Haifisch grob 90°*. Hier ergaben sich keine signifikanten Unterschiede bei den erzielten Fließlängen. Somit kann eine Strömungsverbesserung durch eine Oberflächenstruktur im Schwerkraft-Kokillengießen ausgeschlossen werden.

e) *Wirksamkeit der Oberflächenstruktur ist vom Druck abhängig! Ja!*

Ein wichtiger Erkenntnisgewinn der durchgeführten Untersuchungen war, dass die Oberflächenstrukturen druckabhängig gefüllt werden. Wird die potenzielle Energie der Schmelze, welche aus der Eingießhöhe resultiert, in kinetische Energie umgewandelt, werden die Oberflächenstrukturen überströmt. Das Überströmen wiederum ist abhängig von der geometrischen Beschaffenheit der Oberflächenstruktur und der Oberflächenspannung der Schmelze. Liegt der Prozessdruck unterhalb des strukturabhängigen Laplace-Druckes werden die Strukturen nicht/ teilgefüllt. Ist die Kavität gefüllt, wird das statische Druckniveau in der Kavität durch die Höhe des mit Schmelze gefüllten Eingießtrichters bestimmt. Liegt am Ende der Formfüllung der metallostatistische Druck über dem strukturabhängigen Laplace-Druck werden die Oberflächenstrukturen vollständig gefüllt (Kapitel 6.1.3).

f) *Wirksamkeit einer Oberflächenstruktur kann mittels des Gesamt-Wärmedurchlasskoeffizienten bestimmt werden! Ja!*

Die zwei wichtigsten Strukturmerkmale zur Steigerung der Fließ- und Formfülllänge (Kontaktfläche zwischen Schmelze und Kokille und Luftvolumen in den Strukturvertiefungen) konnten zielführend zur Berechnung des Gesamt-Wärmedurchlasskoeffizienten miteinander kombiniert werden. Hierdurch ist es nun möglich das Potenzial zur Steigerung der Fließlänge durch eine Oberflächenstruktur zu berechnen. Die Gültigkeit konnte mit der verbesserten, neu entwickelten Oberflächenstruktur *Carbon* nachgewiesen werden. Bei dieser Struktur ergab sich eine rechnerische Fließlängensteigerung von +200 % und eine experimentell nachgewiesene Steigerung von +190 % (Kapitel 7.2).

g) *Der Verschleiß der Oberflächenstruktur führt zur Reduzierung der Fließ- und Formfülllänge! Ja!*

Die durchgeführten Verschleißuntersuchungen im Labormaßstab an drei Oberflächenstrukturen zeigten, dass mit stetiger Abnahme der Strukturhöhe die Fließ- und Formfülllänge reduziert wird (vgl. Anhang W). Filigrane Strukturen wie die Struktur *Haifisch grob* sind besonders anfällig, wodurch mit einem starken Abfall der Fließ- und Formfülllänge nach wenigen 10.000 Abgüssen zu rechnen ist. Angesichts dieser Problematik sollten neue Reinigungskonzepte, geeignete Schutzmaßnahmen und wirtschaftliche Instandhaltungsmaßnahmen erarbeitet werden. Kompakte Strukturen wie *Waffel 45°* sind hingegen sehr widerstandsfähig und zeichnen sich durch konstante Fließ- und Formfülllängen aus.

h) *Oberflächenstrukturen haben einen negativen Einfluss auf die Dauerfestigkeit! Ungeklärt!*

Diese These kann bis dato nicht abschließend be- oder widerlegt werden. Die bisher durchgeführten experimentellen Untersuchungen lassen keine aussagekräftigen Interpretationen zu. Tendenziell ist davon auszugehen, dass ein glattes, unstrukturiertes Gussteil, im Vergleich zu einem strukturierten Gussteil, größere Lastschwingspielzahlen erträgt. Der erarbeitete Stand kann dem Anhang X entnommen werden.

Die gewonnen Erkenntnisse aus den numerischen und experimentellen Untersuchungen wurden genutzt, um eine Serienkokille für einen dünnwandigen Aluminium-Hilfsrahmen zu entwickeln [16; 94; 151]. Zur Reduzierung der fertigungsbedingten Wandstärken und zur Verbesserung der Fließ- und Formfülllängen wurden die Oberflächenstrukturen *Haifisch* und *Noppe (L)* verwendet, vgl. Bild 10.1. Die hergestellten, partiell wandstärkenreduzierten Hilfsrahmen (-30 %) zeigten gegenüber dem Serienstand mit der Struktur *Waffel 45°* weder fertigungs- und prozesstechnische Auffälligkeiten, noch eine Reduzierung der Laufleistung auf dem zyklischen Bauteilprüfstand [16].

Um den Einfluss des Verschleißes der Strukturen *Haifisch* und *Noppe (L)* im Serienprozess zu untersuchen, befindet sich seit März 2016 eine MQB-Hilfsrahmenkokille, ohne Wandstärkenreduzierung im Einsatz, bei der drei Einsätze mit strukturierten Oberflächen versehen wurden, Positionierung vgl. Bild 10.1. Bei jeder Kokillenwartung werden die Einsätze geometrisch optisch vermessen (GOM). Der bis dato ermittelte Verschleiß der strukturierten Einsätze ist gering und deckt sich in erster Näherung mit den Prognosen der Verschleißuntersuchungen im Labormaßstab, siehe Anhang W.

Die Daten über die Auswirkung der Dauerbelastung durch die Schmelze, das Nachschichten und der Strukturverschleiß durch mehrfaches Aufbereiten der Kokille sind aktuell vorhanden und werden weiter verfolgt.

Spezielle Reinigungsmaßnahmen, wie die Ultraschallreinigung, sollten zukünftig eingesetzt werden, um den Verschleiß zu minimieren und die Lebensdauer der strukturierten Kokillen zu erhöhen. Ebenso werden weitere Schutzmaßnahmen wie spezielle Oberflächenbehandlungen der Strukturen oder die Aufbringung einer Hartstoffbeschichtung als zielführend erachtet.

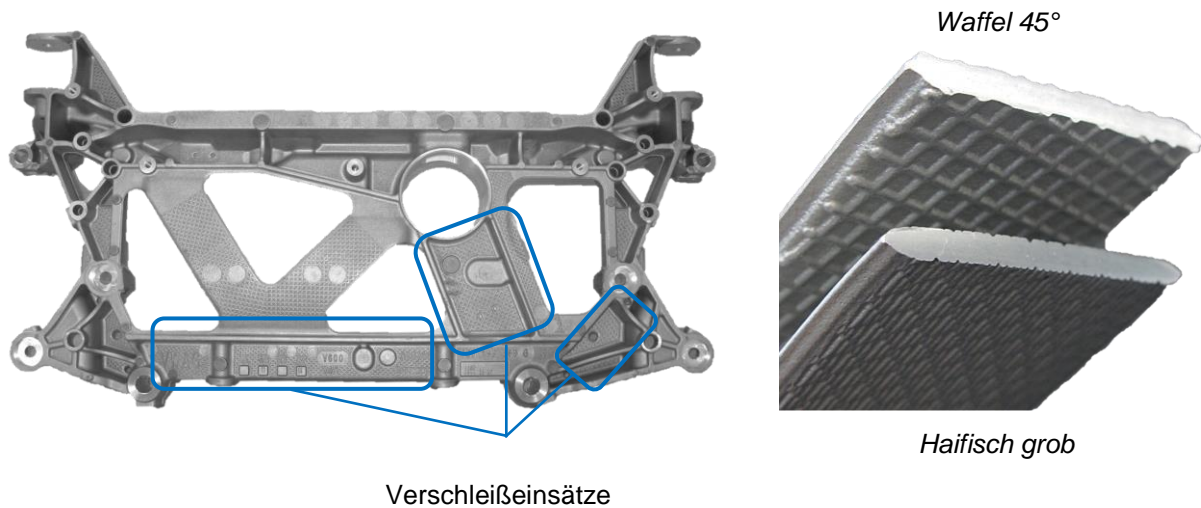


Bild 10.1: Wandstärkenreduzierter MQB-Hilfsrahmen mit Haifisch- und Noppenstruktur

Die Anwendung der gewonnenen Erkenntnisse und Erfahrungen bezüglich der Oberflächenstrukturen auf weitere Gießverfahren, wie das Niederdruckgießen und das Druckgießen, sollten geprüft und nach Bedarf erschlossen werden.

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|------------|--|----|
| Bild 1.1: | Aufzuwendende Massen und Volumina für eine Reichweite von 500 km [5; 6]..... | 1 |
| Bild 1.2: | Einfluss der Fahrwerksbauteile aus Stahl, Gusseisen und Aluminium auf die Fahrzeugmasse bei einem Golf VII im Vergleich zu einem Audi S3 [15; 16]..... | 2 |
| Bild 2.1: | Reduzierung der Gussteilwandstärke durch eine verbesserte Oberflächenstruktur [16] | 3 |
| Bild 2.2 : | Leichtbau bei vollelektrischen Automobilen in Anlehnung an [10; 17; 18] | 4 |
| Bild 3.1: | Aufbau der Arbeit und die Untersuchungsmethodik | 5 |
| Bild 4.1: | MQB-Hilfsrahmen aus einer AlSi11Mg-Legierung mit einer Minimalwandstärke von 5,5 mm..... | 9 |
| Bild 4.2: | Einflussfaktoren auf die Gießeigenschaften von Aluminiumlegierungen nach [33; 37; 38] | 10 |
| Bild 4.3: | Gießspirale aus Formstoff und hergestelltes Gussteil [20; 25; 30; 33; 47; 48]..... | 11 |
| Bild 4.4: | Ermittlung der Fließlänge in Abhängigkeit vom Si-Gehalt mit Hilfe der Gießspirale [25; 44; 49]..... | 12 |
| Bild 4.5: | Röntgen- und Filmaufnahmen vom Formfüllvorgang zur numerischen Validierung [62; 64] | 14 |
| Bild 4.6: | Aufbau zur Visualisierung des Fließvorganges mittels Hochgeschwindigkeitskamera [65; 66]..... | 14 |
| Bild 4.7: | Ausbildung der Strömungsformen und deren Abhängigkeiten nach Campbell [40]..... | 17 |
| Bild 4.8: | Schematisches Aufreißen der Oxidhaut an der Schmelzefront nach Campbell [40]..... | 19 |
| Bild 4.9: | Cassie-Baxter und Wenzel Zustand bezogen auf Kontaktwinkel und Strukturabstand [95]..... | 20 |
| Bild 4.10: | Gussteil aus einer Bolzenkokille (links) [20] sowie Auswertung (rechts) [98]..... | 22 |
| Bild 4.11: | Druckgleichgewicht am Ende der Formfüllung nach [56]..... | 23 |
| Bild 4.12: | Formfüllungsvermögen in Abhängigkeit von der Gießtemperatur und der Druckhöhe [51]..... | 23 |
| Bild 4.13: | Formfüllungsvermögen, Oberflächenspannung und Viskosität im System AlSi [25; 44] | 24 |
| Bild 4.14: | Die Erstarrungsmorphologien im Überblick [101; 102] | 26 |
| Bild 4.15: | Aufbau eines Dendriten mit der Dendritenspitze und den Dendritenarmen [107] | 27 |
| Bild 4.16: | Randschichtdicke in Abhängigkeit vom Wärmeübergangswiderstand [109]..... | 28 |
| Bild 4.17: | Zusammenhang zwischen Benetzungsverhalten und Rauheit [116] | 30 |
| Bild 4.18: | Vergleich zwischen Vakuum, Luftspalt und kompletter Füllung der Schlichte [114] | 31 |
| Bild 4.19: | Verankerung der Oxidhaut durch eine raue Schlichte auf der Kokillenoberfläche [68; 120]..... | 31 |
| Bild 4.20: | Patentierte Oberflächenstruktur für das Stranggießen [121; 122]..... | 32 |
| Bild 4.21: | Patentierte Kühlleisenstrukturen für das Gießen mit verlorenen Formen [133] | 33 |
| Bild 4.22: | Patentierte Oberflächenstruktur für das Gießen mit verlorenen Formen [134] | 33 |

| | | |
|------------|--|----|
| Bild 4.23: | Der Einfluss von Querrillen auf die Fließlänge von Gusseisen [135] | 34 |
| Bild 4.24: | Gussteil aus einer Magnesiumlegierung mit zahlreichen Oberflächenstrukturen [136] | 34 |
| Bild 4.25: | Kokille mit Oberflächenstruktur (links) und schematischer Strukturdarstellung (rechts) [140]..... | 35 |
| Bild 4.26: | Laserstrukturierte Oberflächen für das Niederdruck- und das Schwerkraft-Kokillengießen | 36 |
| Bild 5.1: | Das Berechnungsmodell <i>Fließlänge</i> zur Ermittlung der Fließlänge | 39 |
| Bild 5.2: | Formfüllsimulation mit den strukturierten Oberflächen <i>glatt</i> , <i>Waffel 45°</i> und <i>Q-Rille 2,0 mm</i> | 43 |
| Bild 5.3: | Gegenüberstellung der simulierten, strukturabhängigen Fließlängen..... | 44 |
| Bild 5.4: | Gießplatz mit der modularen Kokille und Messtechnik | 45 |
| Bild 5.5: | Modulare Kokille aus Ober- und Unterteil mit einem hergestellten Gussteil aus AISi11Mg | 46 |
| Bild 5.6: | Schematisches Gussteil mit entsprechender Bezeichnung zur Charakterisierung | 52 |
| Bild 5.7: | Normierte Fließ- und Formfülllänge sowie maximale Gussteilwandstärke..... | 53 |
| Bild 5.8: | Ergebnisgegenüberstellung der ermittelten Fließlängen aus Simulation und Experiment | 55 |
| Bild 6.1: | Berechnungsmodell <i>Durchströmung</i> . Gesamtansicht (links) und vergrößerte Darstellung des Gießkanals mit strömender Schmelze (rechts) | 58 |
| Bild 6.2: | Zeit-Temperaturverläufe der fünf Messpunkte in der Kokille und in der Schmelze | 59 |
| Bild 6.3: | Numerisch ermittelte Fließlängen und strukturabhängige Wärmeströme in die Kokille | 59 |
| Bild 6.4: | Normierte, strukturabhängige Fließlänge über dem Wärmestrom in der Kokille..... | 60 |
| Bild 6.5: | Umbau modulare Kokille für Thermographie- und Hochgeschwindigkeitsaufnahmen [159]..... | 61 |
| Bild 6.6: | Verwendete Oberflächenstrukturen für die Thermographieaufnahmen | 62 |
| Bild 6.7: | Thermographieaufnahme (TH-V01) mit der Struktur <i>Q-Rille 1,0 mm</i> oben und unten.. | 64 |
| Bild 6.8: | Thermographieaufnahme (TH-V04) mit der Struktur <i>Q-Rille 2,0 mm</i> oben und unten.. | 66 |
| Bild 6.9: | Detailansicht der überströmten Struktur <i>Q-Rille 2,0 mm</i> während der Formfüllung..... | 67 |
| Bild 6.10: | Thermographieaufnahme (TH-V07) mit der Struktur <i>Q-Rille 4,0 mm</i> unten..... | 68 |
| Bild 6.11: | Versuchsaufbau für die Hochgeschwindigkeitsaufnahmen mit Frontlicht | 69 |
| Bild 6.12: | Hochgeschwindigkeitsaufnahme (HS-V01) mit einer glatten Oberfläche | 71 |
| Bild 6.13: | Detailansicht HS-V01 mit glatter Oberfläche und möglicher Oxidhaut (Linienmuster) .. | 71 |
| Bild 6.14: | Versuchsaufbau für Hochgeschwindigkeitsaufnahmen im Gegenlicht mit Blick in die Kavität..... | 72 |
| Bild 6.15: | Hochgeschwindigkeitsaufnahme (HS-V4) mit <i>Q-Rille 1,0 mm</i> | 73 |
| Bild 6.16: | Hochgeschwindigkeitsaufnahme (HS-V07) mit <i>Q-Rille 2,0 mm</i> | 74 |
| Bild 6.17: | Verdeutlichung des Untersuchungsziels mit reduziertem metallostatistischem Druck | 75 |
| Bild 6.18: | Reales und schematisches Strukturabbildungsvermögens der Struktur <i>Haifisch grob</i> . | 76 |
| Bild 6.19: | Ermittelte Gussteilwandstärken in Abhängigkeit vom metallostatistischem Druck | 77 |

| | | |
|------------|--|--------|
| Bild 6.20: | Ermitteltes Strukturabbildungsvermögen und Vergleich Laplace- zu Prozessdruck [240 Pa] | 80 |
| Bild 6.21: | Ermitteltes Strukturabbildungsvermögen und Vergleich Laplace- zu Prozessdruck [2.100 Pa] | 81 |
| Bild 6.22: | Berechnungsmodell <i>Erstarrung</i> zur Ermittlung der strukturabhängigen Erstarrungsdauern | 82 |
| Bild 6.23: | Zeit-Temperaturverläufe in der Gussteilmitte bei einer glatten Oberfläche (links) und bei der Struktur <i>Golfball 1,0 mm</i> (rechts) mit einer Gussteilwandstärke von jeweils 6,0 mm. | 84 |
| Bild 6.24: | Erstarrungsdauer in Abhängigkeit von Oberflächenstruktur und Gussteilwandstärke .. | 85 |
| Bild 6.25: | 60 mm-Gussteile zur Analyse der λ_2 -Werte mit Markierung der Messstellen (MS) I, II und III..... | 86 |
| Bild 6.26: | Messstellenentnahme und Definition der fünf Messbereiche über den Gussteilquerschnitt | 87 |
| Bild 6.27: | Verteilung der λ_2 -Werte in Abhängigkeit von der Oberflächenstruktur | 88 |
| Bild 6.28: | Ermittelte λ_2 -Werte im Fließbereich (FB) aus der Simulation und dem Experiment..... | 89 |
| Bild 6.29: | Strukturabhängige Fließlängenänderung über dem λ_2 -Wert im FB der Gussteile | 90 |
| Bild 6.30: | Einfluss des Oberflächenparameter und der Strömungsgeschwindigkeit auf die Fließlänge | 92 |
| Bild 6.31: | Gesamtfließlängen unter Argon-Atmosphäre (links) und Luft-Atmosphäre (rechts) | 94 |
| Bild 6.32: | Unter Argon-Atmosphäre hergestelltes Gussteil mit „Schollenbildung“ im Gießsystembereich..... | 95 |
| Bild 6.33: | Mikroskopische Aufnahme der Gussteiloberfläche mit 20 und 200-facher Vergrößerung | 95 |
| Bild 7.1: | Experimentell ermittelte Fließlängen in Abhängigkeit von den Strukturmerkmalen | 98 |
| Bild 7.2: | Visualisierung einer mit Schmelze benetzten, oberflächenstrukturierten Kokille | 99 |
| Bild 7.3: | Annahmen zur Berechnung des Gesamt-Wärmedurchlasswiderstandes R_{Gesamt} ... | 100 |
| Bild 7.4: | Fließlängen über errechnete, strukturabhängige Gesamt-Wärmedurchlasskoeffizienten | 102 |
| Bild 7.5: | Oberflächenstruktur <i>Carbon</i> | 103 |
| Bild 7.6: | Gussteil mit einer Fließlängensteigerung von +190 % im Vergleich zu einer glatten Oberfläche | 103 |
| Bild 9.1: | Theoretisches Strukturabbildungsvermögen nach Laplace in Abhängigkeit vom Druck | 110 |
| Bild 10.1: | Wandstärkenreduzierter MQB-Hilfsrahmen mit Haifisch- und Noppenstruktur | 115 |
| Bild 10.2: | Rauheiten verschiedener Oberflächen [19] | XXVI |
| Bild 10.3: | Rohrreibungszahl nach Moody und Colebrook [19]..... | XXVI |
| Bild 10.4: | Formfüllsimulation mit den strukturierten Oberflächen <i>glatt</i> , <i>Golfball 3,0 mm</i> und <i>ccc 2.0</i> | XXVIII |

| | | |
|-------------|---|--------|
| Bild 10.5: | Formfüllsimulation mit den strukturierten Oberflächen <i>glatt</i> , <i>Noppe (L)</i> und <i>Haifisch grob</i> | XXIX |
| Bild 10.6: | Formfüllsimulation mit den strukturierten Oberflächen <i>glatt</i> , <i>Eagle Eye</i> und <i>Carbon</i> | XXX |
| Bild 10.7: | Bildersequenz (v.l.n.r.) von der symmetrischen Formfüllung der linken und rechten Kavität der modularen Kokille (1 Bild \triangleq 0,4 s) Kokillenoberteile sind ausgeblendet | XXXIII |
| Bild 10.8: | Zeit- Temperaturverlauf der durchgeführten Gießversuche zur Ermittlung der strukturabhängigen Fließ- und Formfülllängen im Vergleich zu einer glatten Oberfläche | XXXV |
| Bild 10.9: | Stitching-Aufnahme und Vermessung eines Gussteiles mit der Struktur <i>Waffel 45°</i> .. | XLI |
| Bild 10.10: | Stitching-Aufnahme und Vermessung eines Gussteiles mit der Struktur <i>Haifisch grob</i> | XLII |
| Bild 10.11: | Stitching-Aufnahme und Vermessung eines Gussteiles mit der Struktur <i>Carbon</i> | XLIII |
| Bild 10.12: | Skizze zur Berechnung des struktur- und druckabhängigen Krümmungsradius <i>k_S</i> .. | XLVI |
| Bild 10.13: | Vermessung der Längsrillen im Querschliff unter 50-fache Vergrößerung | LV |
| Bild 10.14: | Vergleich zwischen theoretischer und erreichter Tiefe und Breite der Rillen | LVI |
| Bild 10.15: | Auswertung der Tiefen-Breitenverhältnisse und das resultierende Luftvolumen | LVI |
| Bild 10.16: | Versuchsaufbau zum teilautomatisierten Strahlverschleiß mit Glasbruch | LVII |
| Bild 10.17: | Verschleißzustände der Oberflächenstrukturen <i>Haifisch grob</i> (links) und <i>Noppe (L)</i> (rechts) | LX |
| Bild 10.18: | Verschleißzustände der Oberflächenstruktur <i>Waffel 45°</i> | LXI |
| Bild 10.19: | Die Fließ- und Formfülllänge der Struktur <i>Haifisch grob</i> in Abhängigkeit vom Verschleiß | LXII |
| Bild 10.20: | Die Fließ- und Formfülllänge der Struktur <i>Noppe (L)</i> in Abhängigkeit vom Verschleiß | LXIII |
| Bild 10.21: | Die Fließ- und Formfülllänge der Struktur <i>Waffel 45°</i> in Abhängigkeit vom Verschleiß | LXIII |
| Bild 10.22: | Die Fließ- und Formfülllänge in Abhängigkeit von der Wandstärke mit glatter Oberfläche | LXIV |
| Bild 10.23: | Proben für Dauerschwingversuche, <i>glatt</i> , <i>Haifisch grob</i> , <i>Noppe (L)</i> und <i>Waffel 45°</i> (v.l.n.r.) | LXVI |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|----------------|---|--------|
| Tabelle 4.1: | Einflussgrößen auf die Fließlänge bei AlSi-Legierungen | 21 |
| Tabelle 4.2: | Einflussgrößen auf das Formfüllungsvermögens bei AlSi-Legierungen | 25 |
| Tabelle 4.3: | Werte für die Legierungskonstante k von Aluminiumlegierungen [107]..... | 27 |
| Tabelle 4.4: | Die wichtigsten Einflussgrößen auf die Erstarrung bei AlSi-Legierungen | 29 |
| Tabelle 4.5: | Theoretische Wirkmechanismen der Oberflächenstrukturen | 38 |
| Tabelle 5.1: | Numerisch untersuchte Oberflächen bzw. Oberflächenstrukturen als CAD-Daten..... | 41 |
| Tabelle 5.2: | Übersicht der Trichtervarianten und die resultierenden Eigenschaften | 47 |
| Tabelle 5.3: | Parameter der Gießversuche zur Ermittlung der Fließ- und Formfülllänge..... | 51 |
| Tabelle 5.4: | Chemische Zusammensetzung der vergossenen AlSi11Mg-Legierung (TL 118) [161] | 52 |
| Tabelle 6.1: | Übersicht der Versuchskonfigurationen der Thermographieaufnahmen..... | 63 |
| Tabelle 6.2: | Übersicht der Versuchskonfigurationen der Hochgeschwindigkeitsaufnahmen..... | 70 |
| Tabelle 6.3: | Die drei Phasen während des strukturabhängigen Formfüllvorganges | 79 |
| Tabelle 6.4: | Der Einfluss der Oberflächenstruktur auf das Gussteilvolumen und die Kontaktfläche | 83 |
| Tabelle 10.1: | Charakterisierung der Oxidhäute von Aluminium [59] | XXVII |
| Tabelle 10.2: | Randbedingungen für das Berechnungsmodells <i>Fließlänge</i> | XXVII |
| Tabelle 10.3: | Ergebniszusammenfassung Berechnungsmodell <i>Fließlänge</i> | XXXI |
| Tabelle 10.4: | Parameter und Größen zur gießtechnologischen Auslegung der modularen Kokille | XXXII |
| Tabelle 10.5: | Charakterisierung der Oberflächenstrukturen sowie gießtechnologische Eigenschaften | XXXVI |
| Tabelle 10.6: | Randbedingungen für das Berechnungsmodells <i>Durchströmung</i> | XXXVII |
| Tabelle 10.7: | Datengrundlage zur Berechnung des Laplace-Druck pro Prozessdruck (240 Pa)... | XLVII |
| Tabelle 10.8: | Datengrundlage zur Berechnung des Laplace-Druck pro Prozessdruck (2.100 Pa) | XLVIII |
| Tabelle 10.9: | Randbedingungen für das Berechnungsmodell <i>Erstarrung</i> | XLIX |
| Tabelle 10.10: | Ergebnisse zum Berechnungsmodell <i>Erstarrung</i> mit 6 mm Gussteilwandstärke | L |
| Tabelle 10.11: | Ergebnisse zum Berechnungsmodell <i>Erstarrung</i> mit 10 mm Gussteilwandstärke | LI |
| Tabelle 10.12: | Ergebnisse zum Berechnungsmodell <i>Erstarrung</i> mit 14 mm Gussteilwandstärke | LII |
| Tabelle 10.13: | Ergebnisse zu den strukturabhängigen λ_2 -Werten bei 6 mm Gussteilwandstärke | LIII |
| Tabelle 10.14: | Datengrundlage zur Berechnung des Gesamt-Wärmedurchlasskoeffizienten u_{ges} ... | LIV |
| Tabelle 10.15: | Prozessgrößen für den halbautonomen Strahlverschleiß der Oberflächenstrukturen | LVIII |
| Tabelle 10.16: | Annahmen zur Lebensdauerabschätzung für die drei Oberflächenstrukturen | LXV |
| Tabelle 10.17: | Ergebnisse zu den strukturabhängigen Lastschwingspielzahlen..... | LXVII |

Literaturverzeichnis

- [1] Sterner, M. und Standler, I.: Energiespeicher, Bedarf, Technologien, Integration, Berlin , Heidelberg, Springer, 2014.
- [2] Axel Springer Auto Verlag GmbH: Das kostet das Volltanken, www.autobild.de/bilder/bilder-das-kostet-volltanken-1144701.html.
- [3] Tesla Motors GmbH: Model 3, www.tesla.com/de_DE/model3.
- [4] Axel Springer Auto Verlag GmbH: Endlich: Alle Infos zum Model 3, www.autobild.de//artikel/-model-3-2017-infos-5215630.html.
- [5] Helmholt, R. und Eberle, U.: Fuel cell vehicles: Status 2007, *Journal of Power Sources*, 165, 2007, H. 2, S. 833–843.
- [6] Schüth, F.: Challenges in hydrogen storage, *The European Physical Journal Special Topics*, 176, 2009, S. 155–166.
- [7] Günnel, T.: Was bringt Leichtbau beim Elektrofahrzeug?, www.automobil-industrie.vogel.de/was-bringt-leichtbau-beim-elektrofahrzeug.de-a-588846.
- [8] Wiedemann, J.: Leichtbau bei Elektrofahrzeugen, Wieviel ist er uns (noch) wert?, *ATZ-Automobiltechnische Zeitung*, 111, 2009, H. 06, S. 462–463.
- [9] Schlott, S.: Innovativer Leichtbau ist eine Schlüsseltechnologie, *ATZ-Automobiltechnische Zeitung*, 119, 2017, H. 5, S. 24–27.
- [10] Eckstein, L.; Schmitt, F. und Hartmann, B.: Leichtbau bei Elektrofahrzeugen, *ATZ-Automobiltechnische Zeitung*, 112, 2010, H. 11, S. 788–795.
- [11] Leohold, J.: Automobile Zukunft im Volkswagenkonzern, *AutoUni*, 2015.
- [12] Bittner, G.; Kniewallner, L.; Menk, W. und Schumacher, P.: Dünnwandige Strukturteile für den Fahrzeugbau, *Giesserei*, 91, 2004, H. 10, S. 32–38.
- [13] Decking, K.: Leichtbau mit bionischem Guss, Gewichtsreduktion durch den optimalen Einsatz und die Kombination von Design, Werkstoffen und Herstellungsverfahren, *Giesserei*, 09/2013, H. 100, S. 74–75.
- [14] Schlott, S.: Die Gewichtsspirale ist durchbrochen, *ATZ-Automobiltechnische Zeitung*, 114, 2012, H. 05, S. 378–380.
- [15] Beganovic T. und Gierth, S.: Innovation im Leichtmetallguss: Wandstärkenreduzierung durch Oberflächenstrukturierung, *VDI-Tagung, Gießen von Fahrwerks- und Strukturbauteilen*, 2016.
- [16] Beganovic, T.: Evolution im Aluminium-Guss von Fahrwerk-Komponenten, *TU Bergakademie Freiberg, Dissertation*, 2016.
- [17] Dick, M.: Leichtbau und Elektrifizierung – Zukunftskompetenz im Spannungsfeld zwischen Technologiefortschritt und Kundennutzen, *Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motortechnik*, Aachen, 2009.

-
- [18] Rabe, M.: Herausforderungen an die zukünftige Karosserieentwicklung, Aachener Karosserietage, Aachen, 2009.
- [19] Czichos, H. und Hennecke, M.: HÜTTE - Das Ingenieurwissen, 33. Auflage, Springer Berlin Heidelberg, 2008.
- [20] Spur, G.; Michaeli, W. und Bührig-Polaczek, A.: Handbuch Urformen, Carl Hanser Verlag GmbH & Company KG, 2013.
- [21] Einenkel, E.; Wolf, R.; Stötzel, R.; Neun, W. und Werner, H. J.: Leistungssteigerung im Aluminium-Automobilguss durch neuartige Kokillenschichten, Giesserei, 97, 2010, H. 4, S. 26–30.
- [22] Gießerei-Jahrbuch, Düsseldorf, Giesserei-Verlag GmbH, 2008.
- [23] Brunhuber, E.: Giesserei-Lexikon, 15. Auflage, Berlin, Schiele & Schön, 1991.
- [24] Schneider, P.: Kokillen für Leichtmetallguß, Düsseldorf, Giesserei-Verlag GmbH, 1986.
- [25] Altenpohl, D.: Aluminium und Aluminiumlegierungen, Berlin, Springer-Verlag, 1965.
- [26] Rheinfelden Alloys GmbH & Co. KG: Hüttenaluminium-Gusslegierungen, Rheinfelden, 12/2016.
- [27] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Aluminium und Aluminiumlegierungen - Gußstücke - Chemische Zusammensetzung und mechanische Eigenschaften, 2013, DIN EN 1706, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 30.03.2017.
- [28] DIN EN 100025-2.
- [29] Sahm P. R. und Engler S.: Gießereikunde, Manuskript zur Vorlesung Gießereikunde an dem Gießerei-Institut der RWTH Aachen, Aachen, 1998.
- [30] Fritz, A. H. und Schulze, G.: Fertigungstechnik, 8. Auflage, Heidelberg, Springer-Verlag, 2008.
- [31] Klein, F. und Fischer, D.F.: Fließ- und Formfüllungseigenschaften metallischer Schmelzen, METALL, 27, 1973, H. 4, S. 326–465.
- [32] Marx, A.: Untersuchungen zum Leichtmetall-Kokillengießen dünnwandiger Bauteile, interner Statusbericht Volkswagen AG, 2012, 61/12.
- [33] Polianska, O.: Technologische Erfordernisse beim Aluminium-Dünnwand-Kokillengießen, Fakultät für Maschinenbau der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Dissertation, 2010.
- [34] Nielsen, F.: Gieß- und Anschnitttechnik: Grundlagen und Anwendung einer Methode, Giesserei-Verlag GmbH, 1987.
- [35] Campbell, J.: Complete Casting Handbook: Metal Casting Processes, Metallurgy, Techniques and Design, Elsevier Science, 2011.
- [36] Jansen, B.; Kättlitz, W.; Kucharcik, L. und Wenk, L.: Anschnitt- und Speisertechnik für das Sand- und Kokillengießverfahren bei Aluminium- und Kupfergußlegierungen, VDG, Düsseldorf, 1992
- [37] Knorr, S.; Gierth, S.; Findeisen, S. und Beganovic T.: Schwerkraftkokillengießen mit strukturierter Kokillenoberflächen, Teil 1: Stand der Technik, Giesserei, 102, 2015, H. 12, S. 42–49.
- [38] Polianska, O.; Bähr, R. und Gutko, J.: Casting alloy properties in gravity die casting of thin aluminium components, Casting Plant & Technology, Materials, 2012, H. 2, S. 8–13.

-
- [39] Kölling, M.; Straub, J. und Grigull, U.: Das Fließ- und Formfüllungsvermögen reiner Metalle - Modellvorstellung und quantitative Beschreibung, METALL, 35. Jahrgang, 1981, Heft 1, S. 30–37.
- [40] Campbell, J.: Complete Casting Handbook: Metal Casting Processes, Metallurgy, Techniques and Design, Elsevier Science, 2015.
- [41] VDG-Merkblatt P120: Maskenspirale für Messung der Fließfähigkeit, Verein Deutscher Gießereifachleute, 1972.
- [42] Kodic, V.: Liquid Metal Properties - Effect on the casting fluidity of alloys, Foundry Trade Journal, 1950, H. 88.
- [43] Di Sabatino, M.: Fluidity of Aluminium Foundry Alloys, 2005.
- [44] Patterson, W. und H. Brand: Zur Messung des Formfüllungsvermögen am Beispiel der Systeme Aluminium-Silizium und Aluminium-Kupfer, Giesserei, 49, 1962, H. 5, S. 110–115.
- [45] Kümmerle, R.: Gießereigenschaften im Systeme Aluminium-Silizium, METALL, 11, 1957, H. 10, S. 848–854.
- [46] Lang, G.: Gießereigenschaften und Oberflächenspannung von Aluminium und binären Aluminiumlegierungen, ALUMINIUM, 48., 1972, S. 664–672.
- [47] Ostermann, F.: Anwendungstechnologie Aluminium, 3. Auflage, Berlin Heidelberg, Springer Vieweg, 2014.
- [48] Gugisch, M.; Bähr, R.; Behm, I. und Polianska, O.: Kausalzusammenhang "Gießtechnologische Legierungseigenschaften - Erstarrungsgefüge" bei Aluminiumlegierungen, Giesserei-Rundschau, 56, 2009, 3/4, S. 50–54.
- [49] Patterson, W. und Kümmerle, R.: keine Angabe, Giesserei, 46, 1959, H. 23, S. 8789–8904.
- [50] Ellerbrok, R.: Über das Formfüllungsvermögen flüssiger Metalle, RWTH Aachen, Dissertation, 1973.
- [51] Englers, S. und Ellerbrok, R.: Über das Formfüllungsvermögen der Gußwerkstoffe, Gießereiforschung, 1974, H. 26, S. 50–62.
- [52] Englers, S. und Ellerbrok, R.: Über das Formfüllungsvermögen von Aluminium-Silizium Legierungen bei Kokillenguß, ALUMINIUM, 1975, H. 51, S. 281–284.
- [53] Adefuye, O. A.: Casting Fluidity of commercially pure Al-Si Casting Alloys, Transnational Journal of Science and Technology, Vol. 4 No. 1, 2014.
- [54] Schröder, A.: Versuche zum Fließvermögen von Gußschmelzen in Sandformen, Gießereiforschung, 35, 1983, H. 1, S. 31–34.
- [55] Mbuya T. O.: Element effects on the fluidity of cast Al-Si alloys, Transactions of American foundrymen society, 11, 2006.
- [56] Wöllmer, H.: Untersuchung zum Präzisionsgießen metallischer Mikroteile, Universität Freiburg, Dissertation, 2000.

-
- [57] Flemings, M. C. und Conrad H. F. and Taylor H. F.: Mold variables influence on fluidity of aluminium, Transactions of American Foundrymen society, 1961, H. 59, S. 566–576.
- [58] Schröder, A.: keine Angabe, Giessereiforschung, 1982, H. 34, S. 143–146.
- [59] Campbell, J.: Castings, 2nd Edition, Oxford, Butterworth-Heinemann, 2003.
- [60] Heckel, T. und Klein, F.: Simulation der Vorgänge beim Kokillengießen, GIESSEREI-PRAXIS, 7, 2004, S. 263–268.
- [61] Flemings, M. C.: Fluidity of metals – Techniques for producing ultra-thin section castings, British Foundrymen, 57, 1964, S. 312–325.
- [62] Schwam, D.; Wallace, J. F.; Engle, T. und Chang, Q.: Gating of Permanent Molds for Aluminum Casting, Final Technical Report, 2004.
- [63] Tscheuschner, D.: Erstarrung einer technischen Al-Si-Mg Legierung in Silica-Aerogelformen, RWTH Aachen, Dissertation, 2002.
- [64] Larsen, P.: Iron Melt Flow in Thin Walled Sections Cast in Vertically Parted Green Sand Moulds, TU Dänemark, Dissertation, 2004.
- [65] Fent, A. und Lang, H.: Konstruktion und Prozessentwicklung eines doppelt eingeformten Magnesium-Strukturteiles, Carl Hanser Verlag, München, 2015.
- [66] Lang, H.: Neue Einblicke in den Druckgießprozess, Untersuchungen einer Aluminiumdruckgussfüllung Highspeed Endoskopie, 2015.
- [67] Ingerslev, P. und Anderson, S. T.: Flow Analysis of mould filling using high speed motion pictures of the metal, Water modeling and numerical calculations, 1987.
- [68] Szalai, B., Z.: Optimierung des Kokillengießverfahrens auf Schutzgasanwendungen, RWTH Aachen, Dissertation, 2012.
- [69] Kümmel, W.: Technische Strömungsmechanik, Theorie und Praxis, 3. Auflage, Teuber Verlag, 2007.
- [70] Friedrich, H. E.: Abbildungsgüte von Stahlfeinguss in keramische Formen – Untersuchung ergebnisrelevanter Verfahrensparameter bei Schalenform- und Gießtechnik, RWTH Aachen, Dissertation, 1984.
- [71] Assael M. J.; Egly I. und Qusted P.: Reference Data for the Density and Viscosity of Liquid Aluminum and Liquid Iron, J. Phys. Chem. Ref. Data, 2006, Vol. 35, No. 1.
- [72] Dinsdale A. T. und Qusted P. N.: The Viscosity of Aluminum and its Alloys – A Review of Data and Models, NPL Materials Centre. National Physical Laboratory.
- [73] Friedrichs A. F.; Wladimirowitsch R. und Zhou Y.: Measurement of viscosity and surface tension of metal melts, Steel Research, 68, 1997, S. 209–214.
- [74] Roach J. S. und Henein H.: A New Method to dynamically Measure the Surface Tension, Viscosity and Density of Melts, Metallurgical and Materials Transactions B, 36, 2005, S. 667–676.
- [75] Brigas, C. W.: Metals Handbook, American Society for Metals, 1961.

-
- [76] Crepeau, P. N.; Tiryakioglu, M. und Campbell, J.: Shape Casting: The 2nd International Symposium, How to Measure Viscosity of Liquid Aluminum Alloy, WILEY-TMS, 2007.
- [77] Feikus und F. J.: Leichtmetall-Sand- und Kokillenguss (44. Folge), Teil 3: Schmelzen, Gießen und Erstarren, Giesserei, 05/2009, H. 96, S. 138–146.
- [78] Meschede, D.: Gerthsen Physik, Springer Berlin Heidelberg, 2015.
- [79] Flemings, M. C.: Fluidity of metals - techniques for producing ultra-thin section castings, International found congress Prague, 1963, S. 61–81.
- [80] Korolkow, A. M.: Liteinye svoistva metallov i splavov, Casting Properties of Metals and Alloys, Izd. Akad. Nauk SSSR, Moscow, 1960.
- [81] Campbell, J.: Castings, 1st Edition, Oxford, Butterworth-Heinemann, 1991.
- [82] Tukdogan, E. T.: Physical Chemistry of High Temperature Technology, London: Academic Press, 1980.
- [83] Fuoco, R.; Correa, E. R.; Bastos, M. A. und Escudero, L. S.: Characterization of Some Types of Oxides Inclusions in Aluminum Alloy Castings, Annual Meeting of the American Foundrymen's Society (AFS): Casting Congress, 1999, H. 107, S. 287–294.
- [84] Crepeau, P. N.: Molten Aluminum Contamination - Gas, Inclusions and Dross, Orlando, Florida, 12.-14.11.1995.
- [85] Bangyikhan, K.: Effects of Oxide film, Fe-rich phase, Porosity and their Interactions on Tensile Properties of Cast Al-Si-Mg-Alloys, Birmingham, 2005.
- [86] Beuchen, W.: Oxidation und Wasserstoffaufnahmen von Aluminiumschmelzen, Bei Formguß während der Schmelzebewegungen möglichst vermeiden!, Giesserei, 1988, 75/15, S. 491–498.
- [87] Grzincic, M.: Gießvorgänge beim Kokillenguss von Al-Legierungen, Dissertation, OVGU Magdeburg, 2003.
- [88] Divandari M., C. J.: Oxide film characteristics of Al-7Si-Mg alloy in dynamic conditions in casting, International Journal of Cast Metals Research, 2004, Vol. 17 Nr. 3, S. 182– 187.
- [89] Agakwu I., Brooks R., Qusted P. R., Fan Z., Ralph B.: Environmental Reaction of Liquid Aluminum, Conference for the Engineering Doctorate in Environmental Technology, United Kingdom, 2003.
- [90] Herrmann, E.: Handbuch des Stranggießens: mit etwa 3300 Patenthinweisen, Düsseldorf, Aluminium-Verlag, 1958.
- [91] Loper C. R. Jr.: Fluidity of Aluminum-Silicon Casting Alloys, AFS Transactions, 1992, H. 147, S. 533–538.
- [92] VDS Vereinigung Deutscher Schmelzhütten: Aluminium Gusslegierungen, Giesserei-Verlag GmbH, 1988.
- [93] Shabestari, S. G.; Miresmaeili, S. M. und Boutorabi, S.M.A.: Effects of Sr-modification and melt cleanliness on melt hydrogen absorption of 319 aluminum alloy, Journal of Materials Science 38, 2003, S. 1901–1907.

-
- [94] Gierth, S.: Einfluss strukturierter Werkzeugoberflächen auf das Fließverhalten von Aluminiumlegierungen im Schwerkraftkokillengießen, RWTH Aachen, Dissertation, 2018.
- [95] Bhushan, B.: Nanotribology and Nanomechanics II, Nanotribology, Biomimetics, and Industrial Applications, 3. Auflage, Heidelberg, Springer, 2011.
- [96] International Journal of Metalcasting, 2008, H. 3, S. 17–26.
- [97] Spasski, A. G.: Grundlagen des Gießereibetriebes, Fachbuchverlag Leipzig, 1955.
- [98] Brecher, C.: Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 2011.
- [99] Brunhuber, E.: Leichtmetall- und Schwermetall-Kokillenguß, 3. Auflage, Berlin, Schiele & Schön, 1958.
- [100] Obuna C. C.: Einsatzmöglichkeiten von Beschichtungssystemen für Gießwerkzeuge im Gießprozess zur Qualitätsverbesserung von Aluminiumgusskolbenrohlingen, RMTTH Aachen, Dissertation, 2004.
- [101] Tiryakioglu, M.; Askeland, D. R. und Ramsey, C. W.: Relationship between Metal Fluidity and Optimum Pouring Time: A Literature Review, AFS Transactions, S. 685–691.
- [102] Aluminium-Taschenbuch, Band 1: Grundlagen und Werkstoffe, 16. Auflage, Düsseldorf, Aluminium-Verlag, 2002.
- [103] Chakrabarti, A. K.: Casting technology and cast alloys, New Delhi, Prentice-Hall of India, 2005.
- [104] Niese J. E.; Flemings M. C. und Taylor H. F: Application of Theory in Understanding of metals, Transactions of American foundrymen society, 1959, Vol. 67, S. 685–697.
- [105] Englers, S. und Lee, Z. H.: keine Angabe, Giessereiforschung, 1978, H. 30, S. 107–116.
- [106] Nechendzi, J. A. und Girschowitsch, N. G.: keine Angabe, Giesserei, 1958, H. 19, S. 1021–1035.
- [107] VDG: Bestimmung des Dendritenarmabstandes für Gussstücke aus Aluminium-Gusslegierungen, P220, 05.01.2017.
- [108] Chvorinov, N.: Theorie der Erstarrung von Gußstücken, Giesserei, 1940, H. 29.
- [109] Siavoshani, S. S.: Effect of substrate properties on molten metal droplet impact, 2001.
- [110] Gierth, S.: Einfluss von Schlichte auf das Fließverhalten von Aluminiumlegierungen, Giesserei, 20, 2016, H. 103, S. 128–129.
- [111] Gierth, S.; Knorr, S.; Beganovic T. und Findeisen, S.: Schwerkraftkokillengießen mit strukturierter Kokillenoberflächen, Teil 2: Innovative Strukturen, Giesserei, 103, 2016, H. 5, S. 24–31.
- [112] Hops, W. und Kendrick, R. S.: Entwicklungen in der Kokillengusstechnologie, GIESSEREI-PRAXIS, 2004, H. 3.
- [113] Psimenos, A. C.; Wendl, S. und Eder, G.: Schlichteentwicklung bei Furtenbach, Giesserei-Rundschau, 52, 2005, 5/6, S. 140–146.
- [114] Sandford, P.: Advances in permanent mold coating technology, 6th International Conference on Permanent Mold Casting of Aluminum and Magnesium, 2008, S. 61–74.

-
- [115] Foseco Foundry Division Vesuvius GmbH: Schichten für den Nichteisen-Kokillenguss, DYCO-TE* HANDBUCH, 2011.
- [116] Griffiths, W. D. und Whitworth, D.: The Effect of the Die Coating on Fluidity in the Gravity Die Casting of Al, University of Birmingham, Interdisciplinary Research Centre in Materials Processing, Department of Metallurgy and Materials Science, 2006.
- [117] Hofmann, V., Meyer, F.: Nanokeramische Beschichtungen steigern Effizienz und Qualität im Al-Kokillenguss, Giesserei, 96, 2009, H. 3, S. 32–37.
- [118] Kawai, K.: Heat transfer through die coatings in Al die casting process, University of Birmingham, Faculty of Engineering, Dissertation, 2004.
- [119] Schulze, T.: Instationärer Wärmeübergang zwischen Gussstück und Kokille, 2004.
- [120] Vogel, W.: Kundenpräsentation, SCHÄFER Chemische Fabrik GmbH.
- [121] Buxmann, K.; Bolliger, M. und Gyongyos, I.: Mold with roughened Surface for Casting Metals, 25.10.1979, Patent US 4250950 A1.
- [122] Buxmann, K.; Bolliger, M. und Gyongyos, I.: Kokille, insbesondere zum Gießen von Aluminium und Aluminiumlegierungen, 28.12.1978, Patent DE 2856472 C2.
- [123] Irmann, R.: Gerillte Stranggießkokillen zur Vermeidung von Kaltschweißstellen, 21.02.1950, Patent 810 175.
- [124] Jean-Marc, J.: Lingotiere de coulée continue de métal liquide tel que l'acier, 22.02.1990, Patent FR 2 65 8440 A3.
- [125] Beyer-Steinhauer, H.; Girgensohn, A.; Reifferscheid, M.; grothe, H.; Capotosti, R. und Cristallini, A.: Verfahren und Vorrichtung zur Verminderung der Wärmeabfuhr einer Stranggusskokille, 25.10.2000, EP 1099496 A1.
- [126] JP 02 020 645 A.
- [127] Patent JP 10 193 042 A.
- [128] Fehlemann, G. und Girgensohn, A.: Verfahren zum Herstellen einer Stranggießkokille, 24.05.2005, Patent DE 10 2005 023 745 A1.
- [129] Speith, K. G. und Bungereth, A.: Verfahren zur Steigerung der Gießleistung beim Stranggießanlagen, 28.10.1952, Patent DBP 1059 154.
- [130] Gaspar, T., A.: Textured Substrate and Method for the direct, continuous Casting of Metal Sheet exhibiting improved Uniformity, 09.01.1986, Patent US 4 705 095.
- [131] Mizikar, E. A.; Wojcik, W. M. und Li, K.: Method of Producing Steel Strip of uniform Thickness by direct Coating, 10.11.1964, Patent US 3 345 738 A1.
- [132] Eastman, M.: Method of Forming textured Casting Rolls with Diamond engraving, 02.12.2008, Patent US 2009/0145567 A1.
- [133] Saeki, K.; Hirose, Y.; Kusano, K.; Tashiro, Y. und Takebayashi, K.: Method for manufacturing a cast steel product, Patent EP 94 688 B1.
- [134] Kopp, H.: Gegossener dünnwandiger Körper, 20.09.1983, Patent 0 106 203 A1.

-
- [135] Hiratsuka, S.; Niyama, E.; Horie, H.; Kowata, T.; Anzai, K. und Makamura, M.: Computer simulation of fluidity and microstructure of thin-sectioned cast iron, *International Journal of Cast Metals Research*, 10, 1998, S. 201–205.
- [136] Rienass, G.: *Leichtmetall Sand- und Kokillenguss* (48. Folge), Teil 2: Magnesiumguss, *Giesserei*, 2013, H. 100, S. 62–68.
- [137] King, M. und Klein, F.: Beantragte Forschungsvorhaben am Europäischen Kompetenzzentrum Metallguss der Fachhochschule Aalen, *Strömungsoptimierte Oberflächenstrukturierung von Druckgießformen mittels Femosekunden-Lasertechnologie*, 25. Aalener Gießereisymposium 2004, *Arbeitsgemeinschaft Metallguss*, S. 5–6, 2004.
- [138] Klein, F.; Kallien, F.; King, M. und Haas, M.: *Strömungsoptimierte Oberflächenstrukturierung von Druckgießformen mittels Femtosekunden-Lasertechnologie*, Abschlussbericht, *BMFB-Idennwettbewerb "Bionik - Innovationen aus der Natur"*.
- [139] Birch, J. M. und Booth, S. E.: Beziehung zwischen Gießparametern und der Oberflächenbeschaffenheit von Zinkdruckguss, *GIESSEREI-PRAXIS*, 1991, 11/12, S. 196–199.
- [140] Knorr, S.: *Numerische und experimentelle Grundlagenuntersuchungen von strukturierten Oberflächen bei Gießwerkzeugen*, TU Bergakademie Freiberg, Masterarbeit, 2014.
- [141] Assar, A. M.: Mould surface roughness and interfacial heat transfer using heat flow model, *Materials Science and Technology*, 13, 2013, H. 8, S. 702–704.
- [142] Coates, B. und Argyropoulos, S. A.: The Effects of Surface Roughness and Metal Temperature on the Heat-Transfer Coefficient at the Metal Mold Interface, *Metallurgical and Materials Transactions B*, 38, 2007, H. 2, S. 243–255.
- [143] Feikus, F. J.: *Leichtmetall-Sand- und Kokillenguss* (43. Folge), Teil 3: Schmelzen, Gießen und Erstarren, *Giesserei*, 95, 2008, S. 58–64.
- [144] Griffiths, W. D. und Kayikci, R.: The effect of varying chill surface roughness on interfacial heat transfer during casting solidification, *Journal of Materials Science*, 42, 2007, H. 11, S. 4036–4043.
- [145] Beganovic, T.; Demmer, C.; Gierth, S.; Kucharski, R.; Findeisen, S. und Knorr, S.: *Gießwerkzeug mit zumindest einer Kavität zur Herstellung zumindest eines Gussteiles*, 27.10.2014, Patent DE 10 2014 221 852 A1.
- [146] Madhusudana, C. V.: *Thermal contact conductance*, 2. Auflage, Cham, Springer, 2014.
- [147] Muojekwu, C. A.; Samarasekera, I. V. und Brimacombe, J. K.: Heat transfer and microstructure during the early stages of metal solidification, *Metallurgical and Materials Transactions B*, 26, 1995, S. 361.
- [148] Loulou, T.; Artyukhin, E. A. und Bardon, J. P.: Estimation of thermal contract resistance during the first stages of metal solidification process: II - experimental setup and results, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 42, 1999, S. 2129–2142.

-
- [149] Griffiths, W. D. und Kawai, K.: The effect of increased pressure on interfacial heat transfer in the aluminum gravity die casting process, *Journal of Materials Science*, 45, 2010, H. 9, S. 2330–2339.
- [150] Fuchs, H. und Egner-Walter, A.: Gießverfahren für Fahrwerks- und Chassisbauteile, Produkt- und Prozessoptionen und -potenziale, *VDI-Berichte*, 2016, Nr. 2274, S. 55–68.
- [151] Knorr, S.; Gierth, S.; Findeisen, S. und Beganovic, T.: Schwerkraftkokillengeißen mit strukturierten Kokillenoberflächen, Teil 3: Serienanwendung, *Giesserei*, 104, 2017, S. 50–57.
- [152] Ivanov, T.: Herstellung mikrostrukturierter Oberflächen im Feingießverfahren, 2013.
- [153] Ivanov, T.; Bührig-Polaczek, A. und Vroomen, U.: Casting of microstructured shark skin surfaces and possible applications on aluminum casting parts, *China Foundry*, 8, 2011, H. 1, S. 62–65.
- [154] Ivanov, T.; Bührig-Polaczek, A.; Vroomen, U.; Hartmann, C.; Holtkamp, J.; Gillner, A.; Bobzin, K.; Bagcivan, N. und Theiss, S.: Investment Casting of Surfaces with Microholes and their possible Applications, *Light Metals*, TMS (The Minerals, Metals & Materials Society), 2011, S. 705–709.
- [155] Jahn, G.: Waffle cast iron cylinder liner, 12.08.1999, Patent 6 123 052.
- [156] Kodama, H. und Fukumoto, T.: Cast-iron insert and method of manufacturing same, 08.05.2003, Patent EP 1 504 833 B1.
- [157] Martin, R.:A.: Cast-in-place iron-based cylinder liners, 10.09.1992, Patent EP 0 532 331 B1.
- [158] Harsch, A.; Möding, H.; Rogalski, J. und Stenzel, O.: Zylinderlaufbuchse, 01.12.1998, Patent EP 0 919 715 B1.
- [159] Buhr, M.: Konstruktive Verbesserung eines Gießwerkzeuges zur Durchführung optischer Untersuchungen an strukturierten Oberflächen im Schwerkraft-Kokillengießen, Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften, Studienarbeit, 2016.
- [160] Pokora, E.; Huynh-Nguyen, H. und Klein, F.: Einfluss der Vernetzung auf die Ergebnisse der numerischen Simulation der Formfüllung und Wärmeübertragung, *Aalen*, 21./22.04.2004.
- [161] Technische Lieferbedingung Gießerei Hannover - Chemische Zusammensetzung des Pfanneninhaltes, 2007.
- [162] Einführung in die Theorie und Praxis der Infrarot-Thermografie, Schulungsunterlagen InfraTec GmbH, Dresden, 2015.
- [163] Stettler Sapphire AG,
www.stettlersapphire.ch/index.php/de/produkte/saphir/eigenschaftencharakteristiken.
- [164] Schindel, B.: Thermografie in der Theorie und der Praxis, 2007.
- [165] www.bossert-weissinger.de/pdf/kataloge_fluke_su-emmissiongrad.pdf, 2018
- [166] Einführung in die Theorie und Praxis der Infrarot-Thermografie, Schulungsunterlagen InfraTec GmbH, Dresden, 2015.
- [167] SCHOTT AG: glass made of ideas, www.schott.com/hometech/english/nextrema/index.html.
-

-
- [168] Hering, E. und Martin, R.: Photonik: Grundlagen, Technologie und Anwendung, Berlin , Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 2006.
- [169] Tränkler, H.-R. und Reindl, L. M.: Sensortechnik: Handbuch für Praxis und Wissenschaft, 2. Auflage, Heidelberg, Springer-Vieweg, 2014.
- [170] Holzfuss, J.: Analoge und digitale Hochgeschwindigkeitkinomatographie, Technisches Messen, 2001, H. 68.
- [171] Buck, F.: Untersuchung physikalischer Vorgänge beim Überströmen strukturierter Werkzeugoberflächen im Schwerkraft-Kokillengießen, Technische Universität Braunschweig, Institut für Strömungsmechanik, Bachelorarbeit, 2015.
- [172] DIN 50600, Metallographische Gefügebilder, 1980.
- [173] Vogel, V.: Einfluß der Formstoffparameter und der Formfüllung auf die Entstehung von Gasporosität bei Aluminium-Sandguß, 2002.
- [174] Poprawe, R.: Lasertechnik für die Fertigung, Grundlagen, Perspektiven und Beispiele für den innovativen Ingenieur, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005.

Nomenklatur

| Lateinische Symbol | Bedeutung | SI-Einheit |
|--------------------|------------------------------|-----------------------|
| <i>a</i> | Abstand | m |
| <i>A</i> | (Ober-)Fläche | m ² |
| <i>A</i> | Arbeit | J |
| <i>b</i> | Breite (Struktur) | m |
| <i>c</i> | Skalierungsfaktor | - |
| <i>c</i> | spezifische Wärmekapazität | J/(kg·K) |
| <i>d</i> | Tiefe (Struktur) | m |
| <i>E</i> | Energie | J |
| <i>F</i> | Kraft | N |
| <i>FL</i> | Fließlänge | m |
| <i>FFL</i> | Formfülllänge | m |
| <i>FFV</i> | Formfüllungsvermögen | m ⁻¹ |
| <i>g</i> | Erdbeschleunigung | m/s ² |
| <i>G</i> | Gießindex | m |
| <i>h</i> | Höhe | m |
| <i>H</i> | spezifische Erstarrungswärme | J/kg |
| <i>k</i> | metallabhängiger Koeffizient | s/m ² |
| <i>k</i> | Wärmedurchgangswiderstand | W/(m ² ·K) |
| <i>l</i> | charakteristische Länge | m |
| <i>L</i> | Länge | m |
| <i>M</i> | Gießmodul | m |
| <i>n</i> | Exponent $1,5 < n < 2,0$ | - |
| <i>p</i> | Druck | Pa |
| <i>r</i> | Radius | m |
| <i>R</i> | Rauheit | µm |
| <i>R</i> | Widerstand | (m ² ·K)/W |
| <i>Re</i> | Reynoldszahl | - |
| <i>S</i> | Abstand | m |
| <i>t</i> | Dauer | s |
| <i>T</i> | Temperatur | K |
| <i>u</i> | Wärmedurchlasskoeffizient | W/(m ² ·K) |
| <i>v</i> | Fließgeschwindigkeit | m/s |
| <i>V</i> | Volumen | m ³ |
| <i>W</i> | Leistung | W |

| | | |
|------------|-----------|---|
| We | Weberzahl | - |
| Δx | Strecke | m |

Griechische Symbole

| | | |
|-------------|---------------------------|-----------------------|
| α | Wärmeübergangskoeffizient | W/(m ² ·K) |
| α | Temperaturleitfähigkeit | m ² /s |
| β | Benetzungswinkel | ° |
| δ | Durchbauchung | m |
| ς | Strömungsbeiwert | - |
| η | dynamische Viskosität | Pa·s |
| θ | Öffnungswinkel | ° |
| λ | Rohrreibungszahl | - |
| λ | Dendritenarmabstand | µm |
| λ | Wärmeleitfähigkeit | W/(m·K) |
| ν | kinematische Viskosität | m ² /s |
| ρ | Dichte | kg/m ³ |
| σ | Oberflächenspannung | N/m |
| τ | Schwerspannung | Pa |
| τ | Wärmeeindringtiefe | m |

| Indizes | Bedeutung |
|------------------|------------------|
| 1 | primär |
| 2 | sekundär |
| F | Formfüllung |
| <i>Fließ</i> | Fließen |
| G | Gas |
| <i>Gesamt</i> | Gesamt |
| <i>Guss</i> | Gussteil |
| k | Krümmung |
| K | Kapillar |
| <i>Kokille</i> | Kokille |
| l | liquid |
| L | Laplace |
| <i>Luft</i> | Luft |
| <i>Luftspalt</i> | Luftspalt |
| m | mittlerer |
| <i>Ob</i> | Oberfläche |

| | |
|------------------------|------------------------------|
| <i>Oxid</i> | Oxidhaut |
| <i>s</i> | solid; Erstarrung |
| <i>Schmelze</i> | Schmelze |
| <i>Struktur</i> | Struktur |
| <i>Struktur + Luft</i> | Struktur und Luftkombination |
| <i>System</i> | System |
| <i>Ü</i> | Überhitzung |
| <i>V</i> | Viskosität |
| <i>x</i> | legierungsabhängig |
| <i>y</i> | legierungsabhängig |
| <i>z</i> | gemittelte Rautiefe |

| Abkürzung | Bedeutung |
|------------------|--|
| Al | Aluminium |
| B | Breite |
| C | Kohlenstoff |
| Ca | Calcium |
| <i>ccc 1.0</i> | circular cross cut, Oberflächenstruktur mit 1,0 mm Durchmesser |
| <i>ccc 2.0</i> | circular cross cut, Oberflächenstruktur mit 2,0 mm Durchmesser |
| Cr | Chrom |
| Cu | Kupfer |
| DAS | Dendritenarmabstand |
| DIN | Deutsches Institut für Normung |
| Fe | Eisen |
| FB | Fließbereich |
| FFV | Formfüllungsvermögen |
| FL | Fließvermögen |
| H | Höhe |
| H ₂ | Wasserstoff |
| HRC | Härte Rockwell |
| L | Länge |
| (L) | Verweis auf die lasertechnische Anfertigung der Struktur |
| <i>L-Rille</i> | Längsrille in Strömungsrichtung |
| max | maximal |
| Mg | Magnesium |
| min | minimal |
| Mn | Mangan |
| MQB | Modularer Querbaukasten |
| Na | Natrium |

| | |
|----------------|--------------------------------|
| Ni | Nickel |
| O ₂ | Sauerstoff |
| <i>Q-Rille</i> | Querrille in Strömungsrichtung |
| RB | Randbereich |
| SD | Strahldurchgang |
| Si | Silizium |
| Sr | Strontium |
| Ti | Titan |
| ÜB | Übergangsbereich |
| Zn | Zink |

Anhang

| | | |
|----------|--|---------|
| Anhang A | Beispiele für Oberflächenrauheiten | XXVI |
| Anhang B | Rohrwiderstandeszahlen für Strömungen | XXVI |
| Anhang C | Wachstumsdauer und Oxidhautdicken von Aluminium | XXVII |
| Anhang D | Randbedingungen für das Berechnungsmodell <i>Fließlänge</i> | XXVII |
| Anhang E | Simulationsergebnisse für das Berechnungsmodell <i>Fließlänge</i> | XXVIII |
| Anhang F | Ergebniszusammenfassung Berechnungsmodell <i>Fließlänge</i> | XXXI |
| Anhang G | Gießtechnologische Auslegung der modularen Kokille | XXXII |
| Anhang H | Ergebnisse des Formfüllvorgang der modularen Kokille | XXXIII |
| Anhang I | CAD-Darstellung der modularen Kokille..... | XXXIV |
| Anhang J | Zeit-Temperaturverlauf der modularen Kokille | XXXV |
| Anhang K | Charakterisierung der untersuchten Oberflächenstrukturen..... | XXXVI |
| Anhang L | Randbedingungen für das Berechnungsmodell <i>Durchströmung</i> | XXXVII |
| Anhang M | Datenblätter der thermoschockbeständigen Gläser | XXXVIII |
| Anhang N | Ermittlung des druckabhängigen Strukturabbildungsvermögens | XLI |
| Anhang O | Einfluss des metallostatistischen Druckes auf das Strukturabbildungsvermögen | XLIV |
| Anhang P | Formeln zur Berechnung des Krümmungsradius | XLVI |
| Anhang Q | Berechnung des Laplace-Druckes im Verhältnis zum Prozessdruck | XLVII |
| Anhang R | Randbedingungen für das Berechnungsmodell <i>Erstarrung</i> | XLIX |
| Anhang S | Simulationsergebnisse zum Berechnungsmodell <i>Erstarrung</i> | L |
| Anhang T | Ergebnisse zum strukturabhängigen λ_2 -Wert..... | LIII |
| Anhang U | Datengrundlage zur Berechnung des Gesamt-Wärmedurchlasskoeffizienten <i>uges</i> | LIV |
| Anhang V | Untersuchung zur Herstellbarkeit der Struktur <i>Carbon</i> | LV |
| Anhang W | Strukturspezifisches Verschleißverhalten der Kokillenoberfläche | LVII |
| Anhang X | Lebensdauerabschätzung der Strukturen <i>Haifisch grob, Noppe (L) und Waffel 45°</i> | LXV |
| Anhang Y | Strukturabhängige Dauerfestigkeit der Gussteile | LXVI |
| Anhang Z | Parameter und Zeit-Temperaturverlauf der T6 Wärmebehandlung..... | LXIX |

Anhang A Beispiele für Oberflächenrauheiten

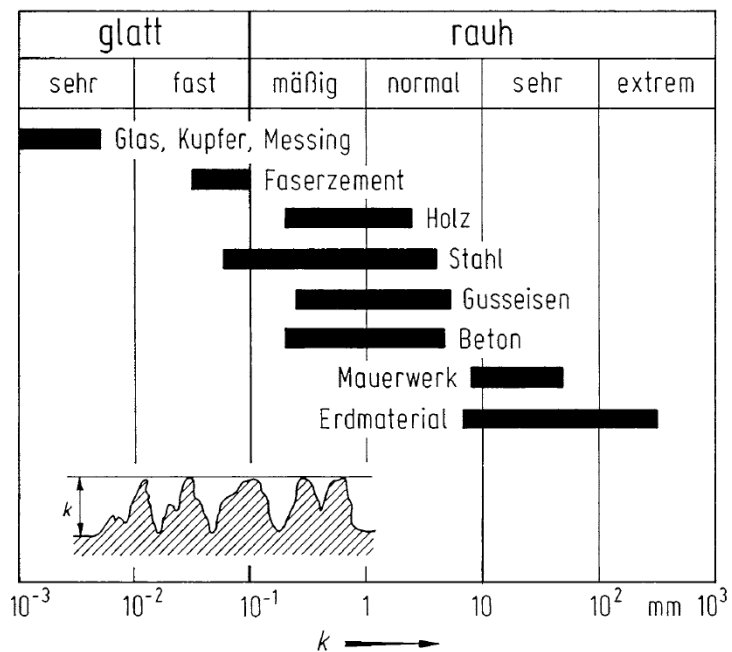


Bild 10.2: Rauheiten verschiedener Oberflächen [19]

Anhang B Rohrwiderstandszahlen für Strömungen

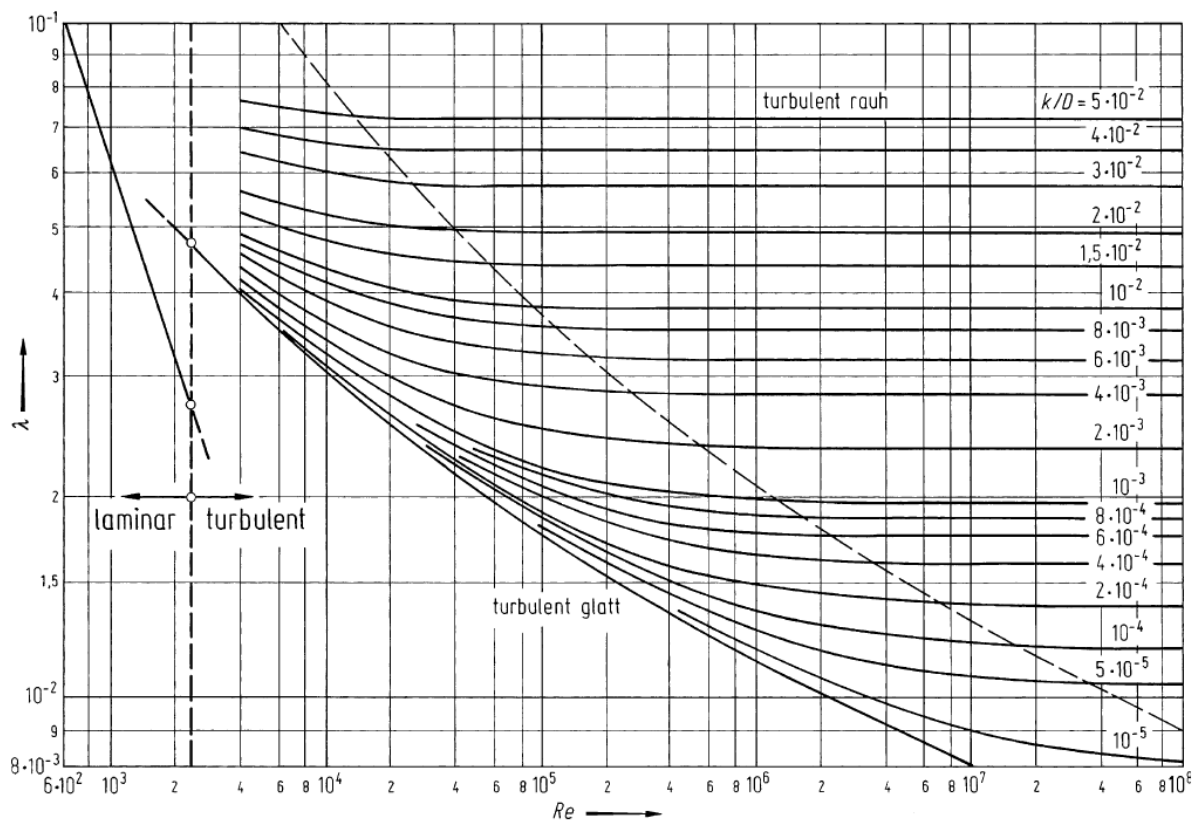


Bild 10.3: Rohrreibungszahl nach Moody und Colebrook [19]

Anhang C Wachstumsdauer und Oxidhautdicken von Aluminium

Tabelle 10.1: Charakterisierung der Oxidhäute von Aluminium [59]

| Wachstumsdauer | Schichtdicke | Typ | Beschreibung | mögliche Quellen |
|-----------------|--------------|-------|-------------------------------------|------------------|
| 0,01 s - 1 s | 1 nm - 1 µm | Jung | Fragment | Gießen |
| 10 s - 60 s | 10 µm | Alt 1 | flexible, dehnbare Schicht | Gießlöffel |
| 10 min - 60 min | 100 µm | Alt 2 | dickere, weniger flexiblere Schicht | Schmelzeofen |
| > 10 h | 1000 µm | Alt 3 | feste Schicht | Warmhalteofen |

Anhang D Randbedingungen für das Berechnungsmodell *Fließlänge*

Tabelle 10.2: Randbedingungen für das Berechnungsmodells *Fließlänge*

| Parameter | Größe |
|--|---|
| Kokillenwerkstoff | X38CrMoV5-1 |
| Initial-Kokillentemperatur | 350 °C |
| Dichte x spezifische Wärmekapazität (konst.) | 7200 kg/m ³ x 420 J/kg·K |
| Wärmeleitfähigkeit (konst.) | 28,6 W/m·K |
| Wärmeübergangskoeffizient ¹ | -1 |
| Oberflächenrauheit | Kontaktfläche bzw. Surface Area Multiplier 1,00 bzw. 0,25 |
| Legierung | AlSi11Mg |
| Gießtemperatur | 575 °C |
| Strömungsgeschwindigkeit | 0,1 m/s |
| Dichte (konst.) | 2.650 kg/m ³ |
| Wärmeleitfähigkeit fest/ flüssig (konst.) | 121 W/m·K / 192 W/m·K |
| spezifische Wärmekapazität (konst.) | 960 J/kg·K |
| Viskosität (konst.) | 0,002 Pa·s |
| Oberflächenspannung (konst.) | 0,9 N/mm |
| Benetzungswinkel | 130° |
| Kantenlänge der Vernetzungselemente (konst.) | 0.2 mm |
| Elementanzahl | 300.000 bis 1.900.000 |
| Simulationsdauer | bis Ende Formfüllung (ca. 0,5 bis 1,0 s) |

¹Der Wärmeübergangskoeffizient wird von Flow 3D anhand der thermophysikalischen Eigenschaften der Schmelze und der Kokille sowie den Strömungsbedingungen automatisch errechnet.

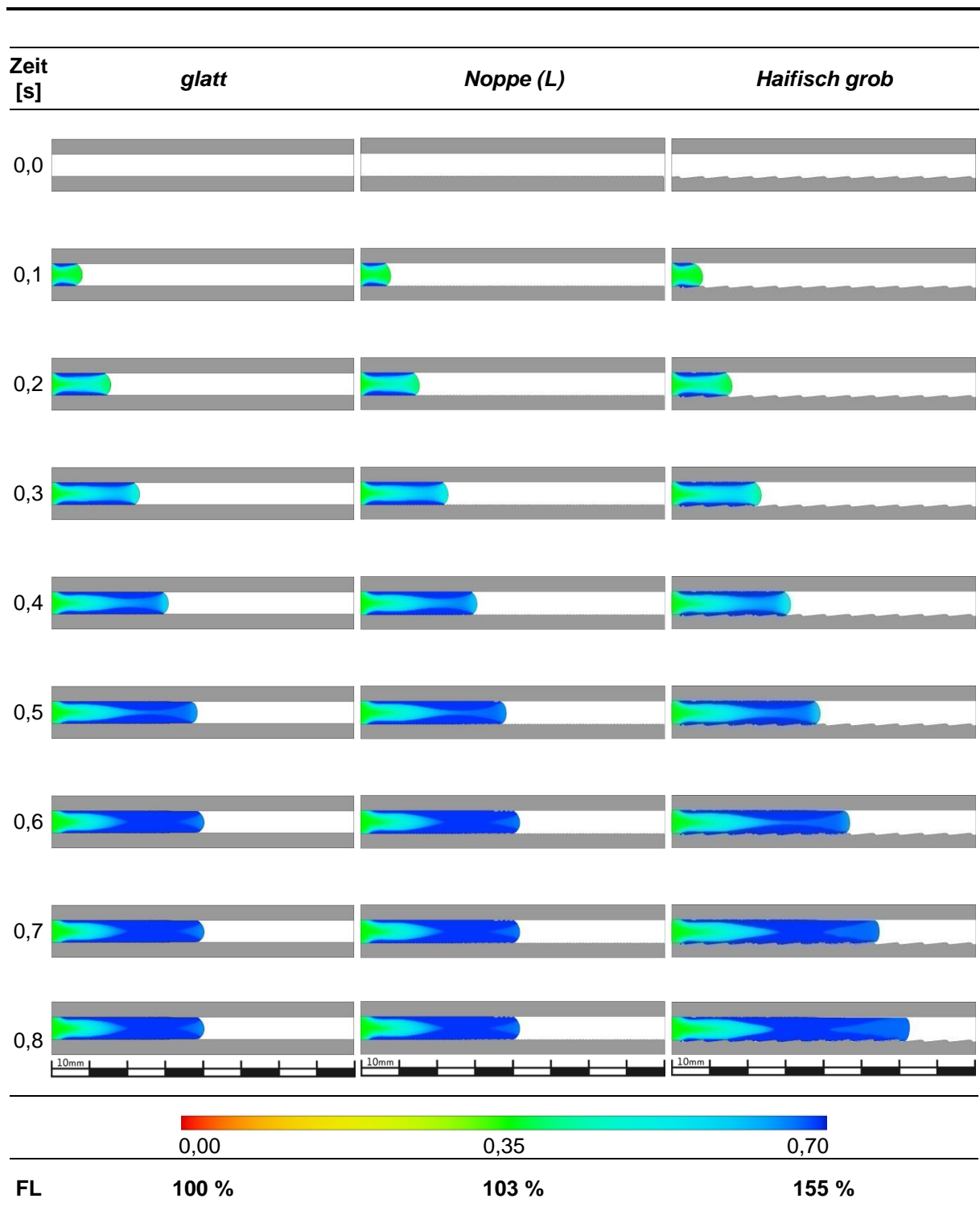


Bild 10.5: Formfüllsimulation mit den strukturierten Oberflächen *glatt*, *Noppe (L)* und *Haifisch grob*

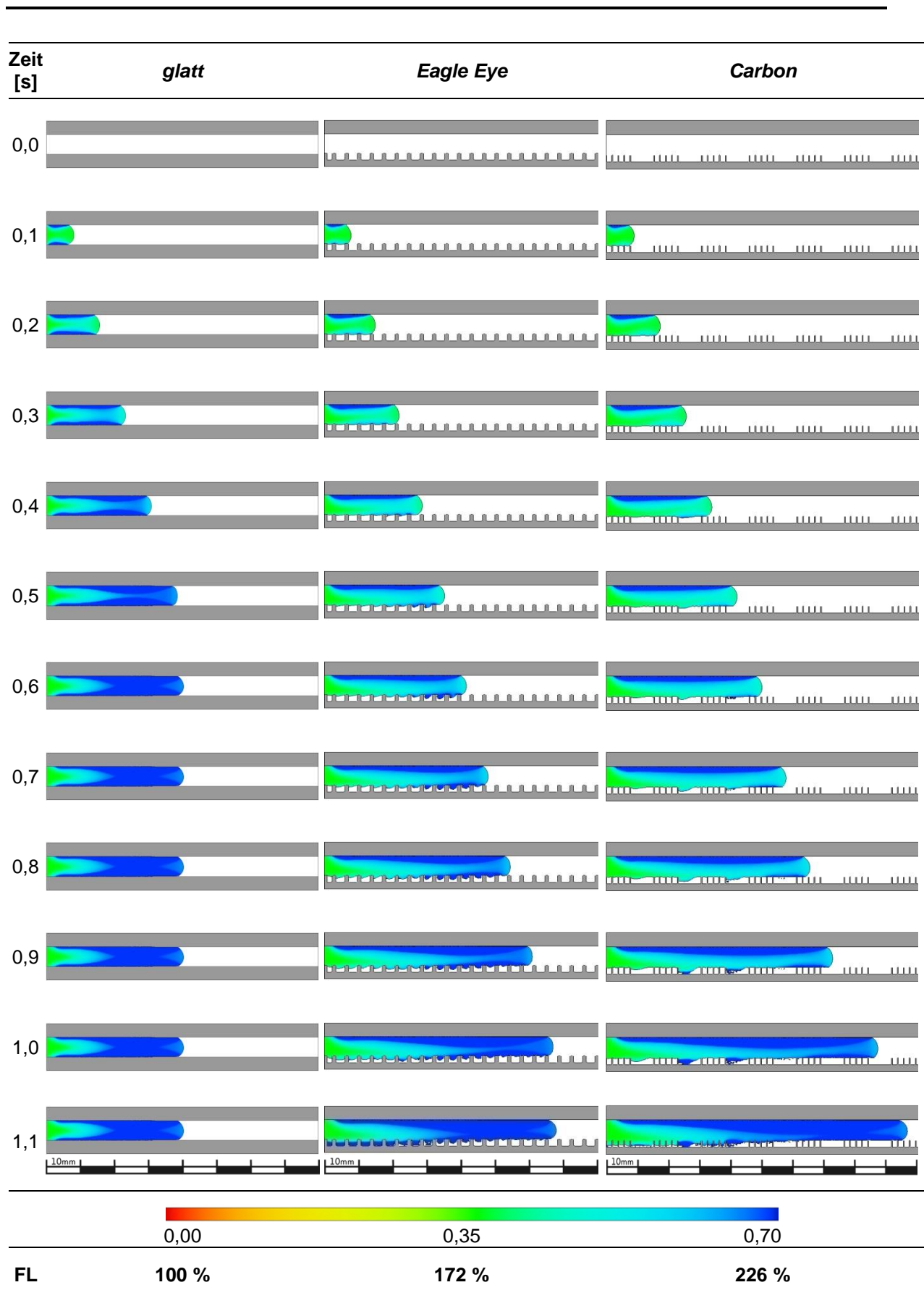


Bild 10.6: Formfüllsimulation mit den strukturierten Oberflächen *glatt*, *Eagle Eye* und *Carbon*

Anhang F Ergebniszusammenfassung Berechnungsmodell *Fließlänge*

Tabelle 10.3: Ergebniszusammenfassung Berechnungsmodell *Fließlänge*

| Struktur | Fließlänge [mm] | normierte Fließlänge |
|---------------------------|------------------------|-----------------------------|
| <i>glatt</i> | 40,3 | 100 % |
| <i>Waffel 0°</i> | 45,7 | 113 % |
| <i>Waffel 45°</i> | 47,5 | 118 % |
| <i>Waffel fein</i> | 47,4 | 118 % |
| <i>Golfball 1,0 mm</i> | 51,8 | 129 % |
| <i>Golfball 2,0 mm</i> | 53,8 | 133 % |
| <i>Golfball 3,0 mm</i> | 55,4 | 137 % |
| <i>ccc 1.0</i> | 51,9 | 129 % |
| <i>ccc 2.0</i> | 67,5 | 167 % |
| <i>Q-Rille 1,0 mm</i> | 45,5 | 113 % |
| <i>Q-Rille 2,0 mm</i> | 51,1 | 127 % |
| <i>Q-Rille 4,0 mm</i> | 52,7 | 131 % |
| <i>L-Rille (L) 1,5 mm</i> | 52,7 | 131 % |
| <i>L-Rille (L) 2,0 mm</i> | 53,6 | 133 % |
| <i>Noppe (L)</i> | 46,5 | 115 % |
| <i>Raute (L)</i> | 48,9 | 121 % |
| <i>Haifisch klein</i> | 53,3 | 132 % |
| <i>Haifisch grob</i> | 50,8 | 126 % |
| <i>Haifisch grob 90°</i> | 50,1 | 124 % |
| <i>Laser diffus</i> | 45,3 | 112 % |
| <i>L-Rille 0,5 mm</i> | 46,1 | 114 % |
| <i>L-Rille 1,0 mm</i> | 50,8 | 126 % |
| <i>L-Rille 1,5 mm</i> | 53,2 | 132 % |
| <i>L-Rille 2,0 mm</i> | 55,9 | 139 % |
| <i>Eagle Eye</i> | 71,7 | 178 % |
| <i>Carbon</i> | 85,9 | 213 % |

Anhang G Gießtechnologischer Auslegung der modularen Kokille

Tabelle 10.4: Parameter und Größen zur gießtechnologischer Auslegung der modularen Kokille

| Parameter | Größe |
|--|--|
| Kokillenwerkstoff | X38CrMoV5-1 |
| Kokillentemperatur | 350 °C |
| Dichte x spezifische Wärmekapazität (konst.) | 7200 kg/m ³ x 420 J/kg·K |
| Wärmeleitfähigkeit (konst.) | 28,6 W/m·K |
| Wärmeübergangskoeffizient ² | (-1) |
| Oberflächenrauheit | Kontaktfläche bzw. Surface Area Multiplier 1,00 |
| Legierung | AlSi11Mg |
| Gießtemperatur | 780 °C |
| Dichte (konst.) | 2.650 kg/m ³ |
| Wärmeleitfähigkeit fest/ flüssig (konst.) | 192 W/m·K / 121 W/m·K |
| spezifische Wärmekapazität (konst.) | 960 J/kg·K |
| Viskosität (konst.) | 0,002 Pa·s |
| Oberflächenspannung (konst.) | 0,9 N/mm |
| Benetzungswinkel | 130° |
| Elementgröße (konst.) | 2,0 mm |
| Elementanzahl | 2.500.000 |
| Simulationszeit | 5,0 s |

²Der Wärmeübergangskoeffizient wird von Flow 3D anhand der thermophysikalischen Eigenschaften und den Strömungsbedingungen automatisch errechnet.

Anhang H Ergebnisse des Formfüllvorgang der modularen Kokille

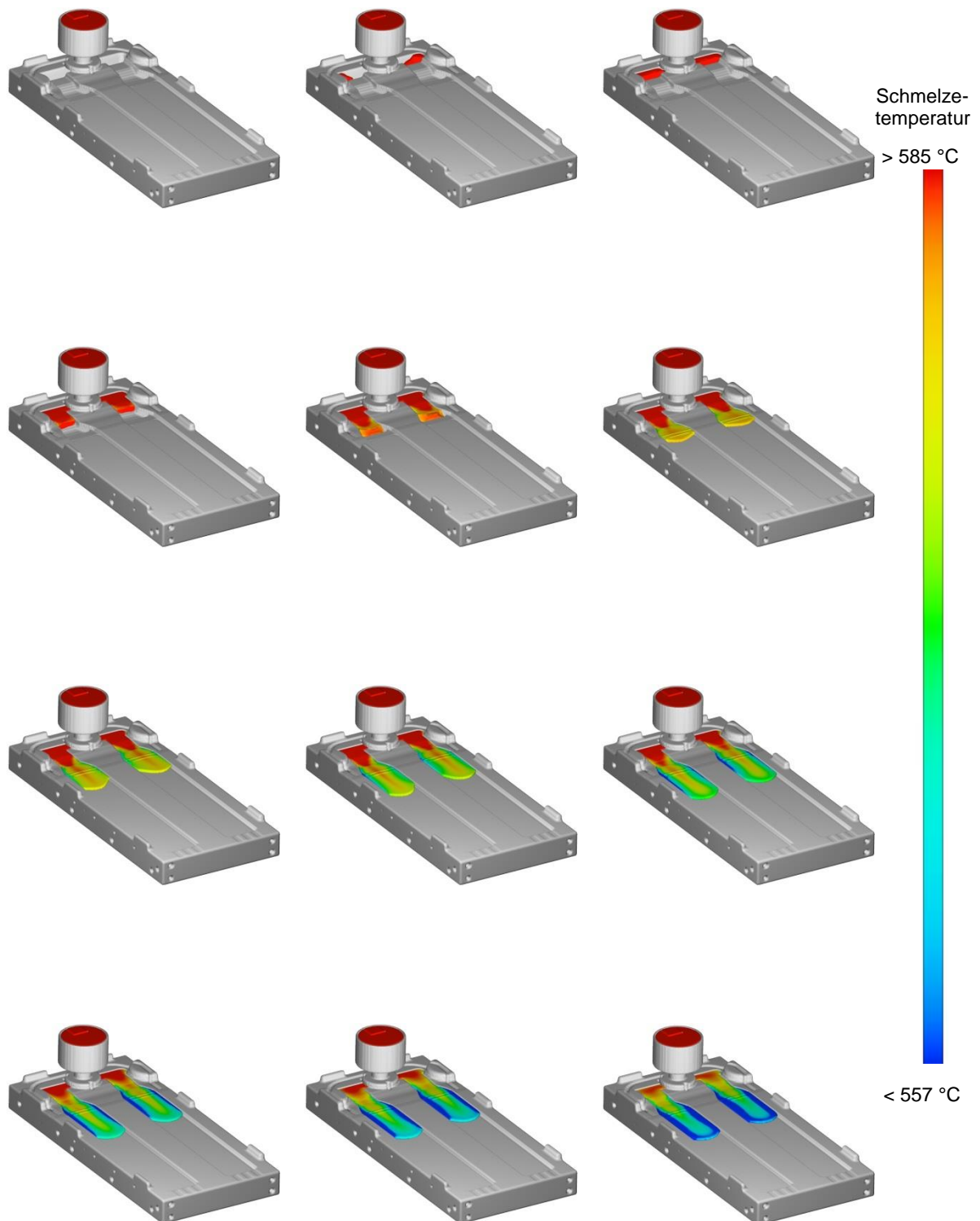
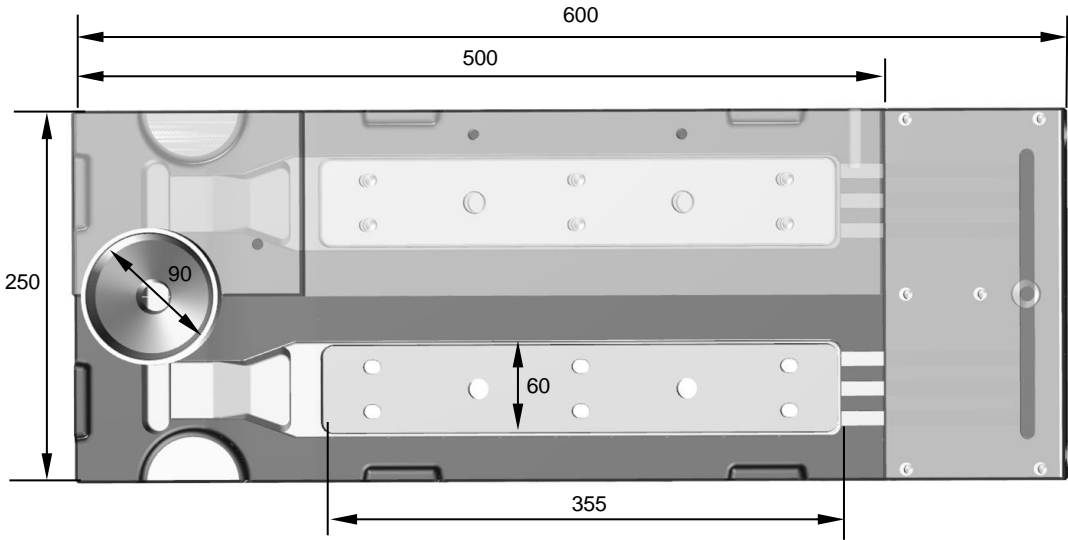
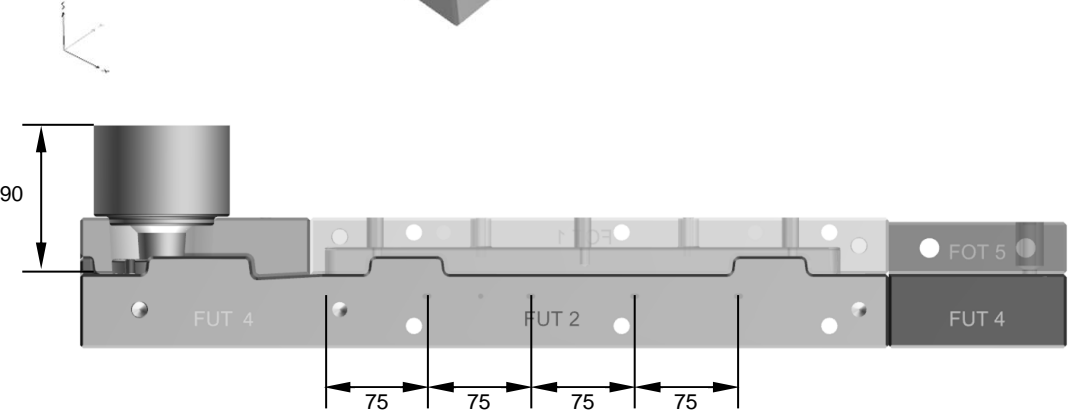
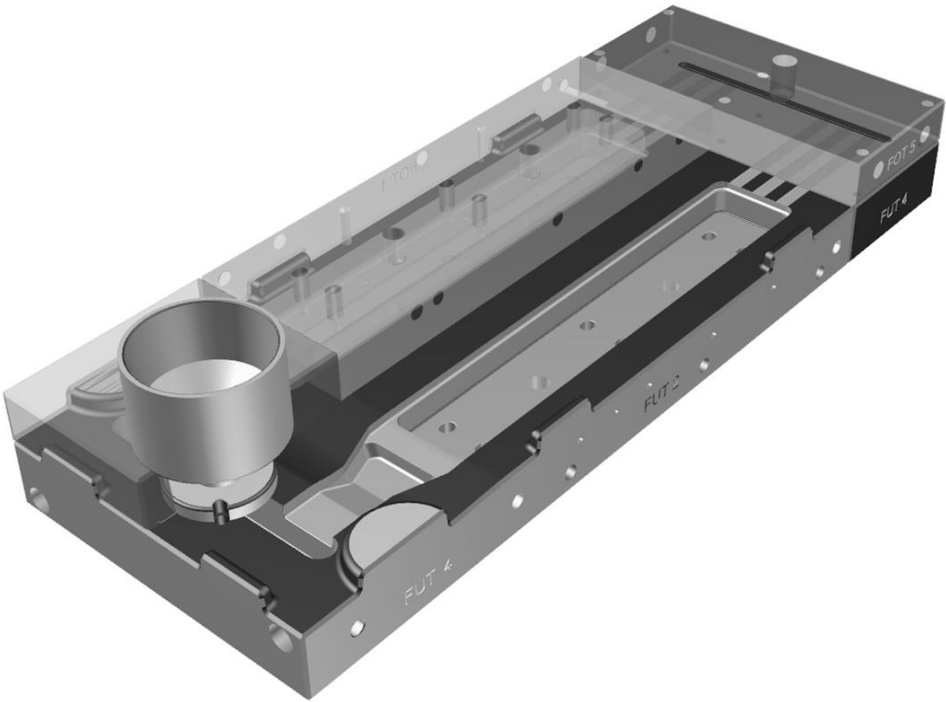


Bild 10.7: Bildersequenz (v.l.n.r.) von der symmetrischen Formfüllung der linken und rechten Kavität der modularen Kokille (1 Bild \cong 0,4 s) Kokillenoberteile sind ausgeblendet

Anhang I CAD-Darstellung der modularen Kokille



Anhang J Zeit-Temperaturverlauf der modularen Kokille

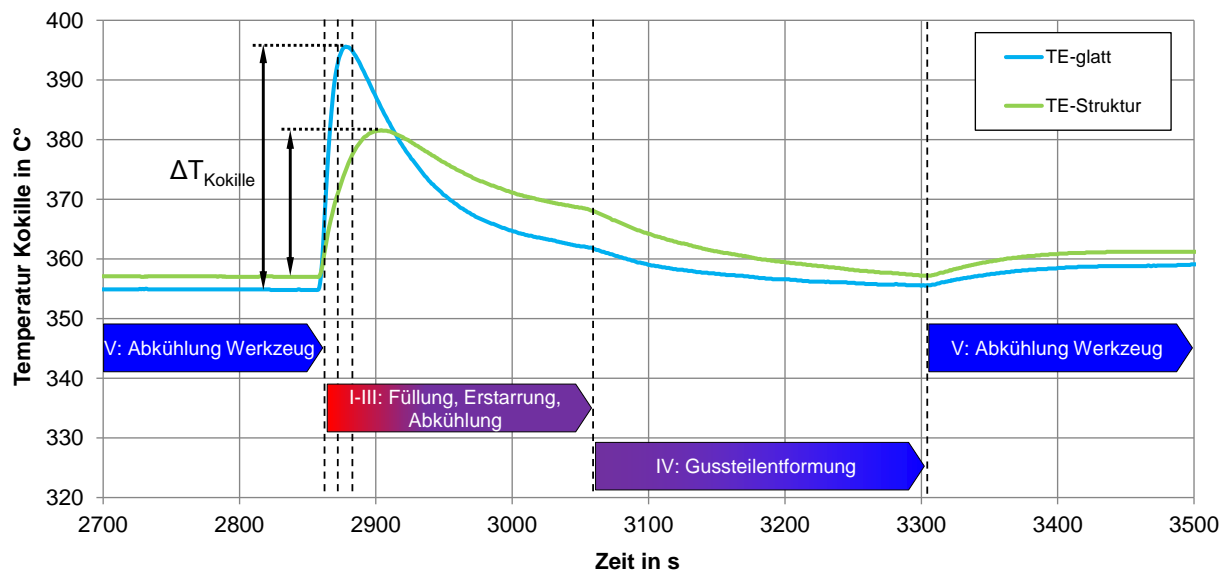


Bild 10.8: Zeit- Temperaturverlauf der durchgeführten Gießversuche zur Ermittlung der strukturabhängigen Fließ- und Formfülllängen im Vergleich zu einer glatten Oberfläche

Anhang K Charakterisierung der untersuchten Oberflächenstrukturen

Tabelle 10.5: Charakterisierung der Oberflächenstrukturen sowie gießtechnologische Eigenschaften

| Struktur | Tiefe [mm] | Breite [mm] | Kontaktfläche | Luftvolumen [mm ³ /mm ²] | Gussteilvolumen ³ | FL | FFL | Fertigungsverfahren und R _z [µm] |
|---------------------------|------------|-------------|------------------|---|------------------------------|-------------------|-------------------|---|
| <i>glatt</i> | 0,00 | 0,00 | 100 % | 0,00 | 100 % | 100 % | 100 % | Fräsen [≈ 20] |
| <i>Waffel 45°</i> | 0,50 | 1,00 | 64 % | 0,14 | 102 % | 151 % | 154 % | Fräsen [≈ 20] |
| <i>Waffel fein</i> | 0,50 | 1,00 | 36 % | 0,23 | 104 % | 155 % | 177 % | Fräsen [≈ 20] |
| <i>Golfball 1,0 mm</i> | 0,50 | 1,00 | 30 % | 0,23 | 100 % | 141 % | 136 % | Fräsen [≈ 20] |
| <i>Golfball 2,0 mm</i> | 1,00 | 2,00 | 28 % | 0,48 | 100 % | 169 % | 218 % | Fräsen [≈ 20] |
| <i>Golfball 3,0 mm</i> | 1,50 | 3,00 | 27 % | 0,73 | 100 % | 189 % | 195 % | Fräsen [≈ 20] |
| <i>ccc 1.0</i> | 0,50 | 1,00 | 11 % | 0,38 | 106 % | 260 % | 308 % | Fräsen [≈ 20] |
| <i>ccc 2.0</i> | 1,00 | 2,00 | 11 % | 0,76 | 112 % | 274 % | 350 % | Fräsen [≈ 20] |
| <i>Q-Rille 1,0 mm</i> | 0,50 | 1,00 | 33 % | 0,26 | 104 % | 129 % | 222 % | Fräsen [≈ 20] |
| <i>Q-Rille 2,0 mm</i> | 1,00 | 2,00 | 33 % | 0,52 | 109 % | 136 % | 187 % | Fräsen [≈ 20] |
| <i>Q-Rille 4,0 mm</i> | 2,00 | 4,00 | 33 % | 1,04 | 117 % | 148 % | 200 % | Fräsen [≈ 20] |
| <i>L-Rille (L) 1,5 mm</i> | 0,75 | 1,50 | 6 %* | 0,52 | 109 % | 213 % | 253 % | Laser [≈ 50] |
| <i>L-Rille (L) 2,0 mm</i> | 1,00 | 2,00 | 5 %* | 0,71 | 112 % | 272 % | 288 % | Laser [≈ 50] |
| <i>Raute (L)</i> | 0,50 | 2,50 | 4 %* | 0,56 | 102 % | 140 % | 120 % | Laser [≈ 50] |
| <i>Noppe (L)</i> | 0,50 | 0,27 | 13 %* | 0,49 | 102 % | 146 % | 184 % | Laser [≈ 50] |
| <i>Haifisch klein</i> | 0,60 | 1,00 | 13 %* | 0,12 | 108 % | 254 % | 214 % | Laser [≈ 50] |
| <i>Haifisch grob</i> | 0,60 | 1,30 | 20 %* | 0,06 | 109 % | 213 % | 293 % | Laser [≈ 50] |
| <i>Haifisch grob 90°</i> | 0,60 | 1,30 | 20 %* | 0,06 | 109 % | 206 % | 232 % | Laser [≈ 50] |
| <i>Laser diffus</i> | 0,25 | 0,10 | 12 %* | 0,00 | 100 % | 226 % | 221 % | Laser [≈ 100] |
| <i>L-Rille 0,5 mm</i> | 0,25 | 0,50 | 29 % | 0,14 | 102 % | 157 % | 101 % | Fräsen [≈ 20] |
| <i>L-Rille 1,0 mm</i> | 0,50 | 1,00 | 17 % | 0,33 | 106 % | 193 % | 191 % | Fräsen [≈ 20] |
| <i>L-Rille 1,5 mm</i> | 0,75 | 1,50 | 12 % | 0,52 | 109 % | 203 % | 179 % | Fräsen [≈ 20] |
| <i>L-Rille 2,0 mm</i> | 1,00 | 2,00 | 9 % | 0,71 | 112 % | 236 % | 224 % | Fräsen [≈ 20] |
| <i>Eagle Eye</i> | 2,00 | 2,00 | 12 %* | 1,54 | 100 % | 215 % | 255 % | Laser [≈ 100] |
| <i>Carbon</i> | 2,00 | 1,50 | 14 % | 1,71 | 100 % | 290% | 270 % | Laser [≈ 50] |
| Bemerkung | | | < 15 % | > 0,60 | < 110 % | > 200 % | > 250 % | > 50 µm |

Fett hervorgehoben sind besondere Strukturmerkmale und gießtechnologische Eigenschaften.

³ Bezogen auf eine Gussteilwandstärke von 6,0 mm bei einer glatten Oberfläche und Komplettfüllung
* Reduzierung der Kontaktfläche um 50 % durch das Fertigungsverfahren Laserstrahl

Anhang L Randbedingungen für das Berechnungsmodell *Durchströmung*

Tabelle 10.6: Randbedingungen für das Berechnungsmodells *Durchströmung*

| Parameter | Größe |
|--|---|
| Kokillenwerkstoff | X38CrMoV5-1 |
| Kokillentemperatur | 350 °C |
| Dichte x spezifische Wärmekapazität (konst.) | 7200 kg/m ³ x 420 J/kg·K |
| Wärmeleitfähigkeit (konst.) | 28,6 W/m·K |
| Wärmeübergangskoeffizient ⁴ | (-1) Kokille ↔ AISi11Mg 20 W/m·K Kokille ↔ Luft ↔ AISi11Mg |
| Oberflächenrauheit | Kontaktfläche bzw. Surface Area Multiplier 1,00 bzw. 0,25 |
| Legierung | AISi11Mg |
| Gießtemperatur | 650°C |
| Strömungsgeschwindigkeit | 0,075 m/s |
| Dichte (konst.) | 2.650 kg/m ³ |
| Wärmeleitfähigkeit fest/ flüssig (konst.) | 121 W/m·K / 192 W/m·K |
| spezifische Wärmekapazität (konst.) | 960 J/kg·K |
| Viskosität (konst.) | 0,002 Pa·s |
| Oberflächenspannung (konst.) | 0,9 N/mm |
| Benetzungswinkel | 130° |
| Atmosphäre | Luft |
| Dichte (konst.) | 1 kg/m ³ |
| Wärmeleitfähigkeit (konst.) | 0,026 W/m·K |
| spezifische Wärmekapazität (konst.) | 1005 J/kg·K |
| Kantenlänge der Vernetzungselemente | 0,125 mm; 0,25 mm; 0,5 mm; 1,0 mm; 2,0 mm |
| Vernetzungsblöcke | 5 |
| Elementanzahl | 780.000 |
| Simulationsdauer | 600 s |

⁴Der Wärmeübergangskoeffizient wird von Flow 3D anhand der thermophysikalischen Eigenschaften und den Strömungsbedingungen automatisch errechnet.

Anhang M Datenblätter der thermoschockbeständigen Gläser

STETTLER
SAPPHIRE

swiss level of perfection

D
F
E

STARTSEITE
PRODUKTE
UNTERNEHMUNG
Dienstleistungen
SOZIALE VERANTWORTUNG
JOBS
KONTAKT

Saphir

Eigenschaften/Charakteristiken

Herstellverfahren

Produkte Uhrenindustrie

Technische Produkte

Klebstoffe und Schutzlacke

Trennscheiben

Eigenschaften/Charakteristiken

Typische Eigenschaften des farblosen Korunds

Physikalische Eigenschaften

| | |
|------------------|--------------------------------|
| Kristallstruktur | hexagonal |
| Chemische Formel | Al ₂ O ₃ |
| Reinheit | 99.99% |
| Spaltbarkeit | muschelrig |
| Dichte | 3.99- 3.98 g / cm ³ |

Thermische Eigenschaften

| | |
|-----------------------------|---------------------|
| Schmelzpunkt | 2050°C |
| Erweichungspunkt | 1800°C |
| Spez. Wärme bei 25°C | 0.18 cal/g. °C |
| Wärmeleitfähigkeit bei 25°C | 0.1 cal/sec. cm. °C |

Mechanische Eigenschaften

| | |
|------------------------------|---|
| Fläche ⊥ zur C- Achse | 5.4. 10 ⁻⁶ /°C |
| Fläche = zur C- Achse | 6.2. 10 ⁻⁶ /°C |
| Härte Mohs | 9 |
| Knoop Fläche ⊥ zur C- Achse | 1800 |
| Knoop Fläche // zur C- Achse | 2200 |
| Elastizitätsmodul | 4.4 x 10 ⁶ kg/cm ² ± 1% Young E |
| Bruchmodul bei 25°C | 4000 kg/cm ² |
| Druckfestigkeit bei 25°C | 21000 kg/cm ² |
| Zugfestigkeit | 1900 kg/cm ² |

Chemische Eigenschaften

| | |
|---|---|
| Angriff auf Säuren und Alkali bei 300°C | 0 |
| Porosität | 0 |

Elektrische Eigenschaften

| | |
|-------------------------------------|--|
| Elektrizitätskonstante | bis 10.5 elektr. Feld // zur C- Achse bei 25°C bis 8.6 elektr. Feld ⊥ zur C- Achse bei 25°C |
| Spez. elektr. Widerstand bei 500°C | 10 ¹¹ ohm/cm |
| Spez. elektr. Widerstand bei 1000°C | 10 ⁶ ohm/cm |
| Spez. elektr. Widerstand bei 2000°C | 10 ³ ohm/cm |

Optische Eigenschaften

| | |
|--|---|
| Lichtbrechung N _D bei 0.5893 um | 1.760 Fläche // C- Achse bei 25°C 1.760 Fläche ⊥ C- Achse bei 25°C |
|--|---|

Lichtdurchlässigkeit:
bei 1mm Dicke

| | |
|-----------------------------|---|
| - im sichtbaren Bereich | vorzüglich |
| - im Infraroten Bereich | 85%= 0.75- 5 µm 70%= 5.5 µm 50%= 6 µm |
| - im ultravioletten Bereich | 80%= 0.4- 0.3 µm 60%= 0.28 µm 50%= 0.2 µm |

SCHOTT NEXTREMA®

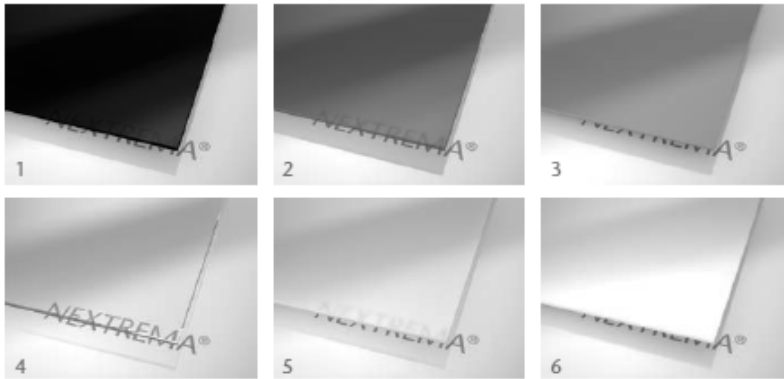
Glass-ceramics engineered and designed for extreme conditions

NEXTREMA® is a unique family of glass-ceramics. This material combines the glossy appearance of glass with exceptional thermal, chemical, optical and mechanical properties like an attractive bending strength of 100 – 160 MPa for materials with a thickness of around 4 mm. With a thermal resistance of 950 °C or for specific applications even higher, combined with a thermal shock resistance of 700 – 820 °C, it ensures a reliable material performance even under extreme temperature conditions. Our six unique glass-ceramic types combined with the wide range of sizes and thicknesses varying from 2 mm to 6 mm (> 6 mm on request) will open up new possibilities in product design and performance. The unique transmission spectra provide new ideas for combining innovative infrared heating functionalities with attractive lighting effects. The versatility of this material will surely impress you.

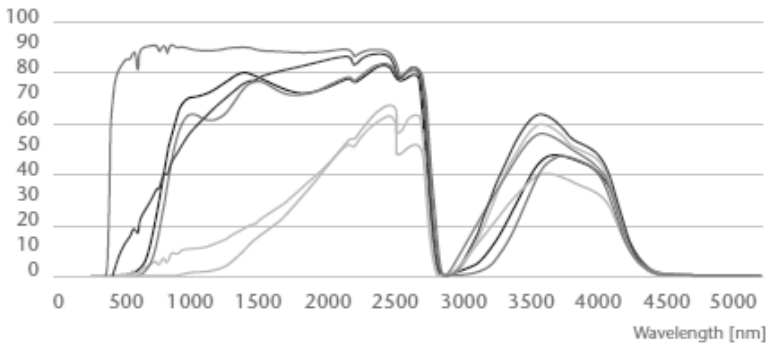
Key properties

- Very low coefficient of linear thermal expansion
- Excellent temperature and thermal shock resistance
- High transmission in infrared range and unique visible light transmission profiles
- Excellent chemical resistance
- High mechanical strength

The six glass-ceramic types



Transmission [%]



- NEXTREMA® 724-8 opaque white
- NEXTREMA® 712-3 tinted
- NEXTREMA® 712-6 translucent bluegrey
- NEXTREMA® 724-3 transparent
- NEXTREMA® 724-5 translucent white
- NEXTREMA® 712-8 opaque grey

This graph is based on data from individual measurements. Deviations may result from manufacturing process. Internal transmissions graph of different ceramization status with sample thickness of approximately 4 mm.



SCHOTT NEXTREMA®

Glass-ceramics engineered and designed for extreme conditions

Standards forms of delivery

| | Standard length | Standard width |
|-----------|-----------------|----------------|
| Thickness | Min. - Max. | Min. - Max. |
| 2 mm | 50 – 1555 mm | 50 – 860 mm |
| 3 mm | 50 – 1930 mm | 50 – 1075 mm |
| 4 mm | 50 – 1930 mm | 50 – 1075 mm |
| 5 mm | 50 – 1930 mm | 50 – 1075 mm |
| 6 mm | 50 – 1930 mm | 50 – 1060 mm |
| ≥ 8 mm | 50 – on request | 50 – 960 mm |

Overview of dimensions: Cut to size panels

Bent panels

Formats of bent panels on request.

Surface characteristics

| | |
|----------------------|--|
| Porosity (ISO 9385): | 0 % |
| Roughness: | Material 724-3 (t = 4 mm) R _a ≤ 0.20 μm R _{ms} ≤ 0.25 μm |

Chemical characteristics

The chemical resistance of NEXTREMA® is more extensive than that of most other comparable materials.

| | | |
|--------------------------------|-----|-------|
| Acid resistance (DIN 12116) | S | 1 – 3 |
| Alkaline resistance (ISO 695) | A | 1 – 2 |
| Hydrolytic class (DIN ISO 719) | HGB | 1 |

All materials fulfill the terms of RoHS without any concerns.

Mechanical characteristics (at room temperature)

| | |
|--|---|
| Density: | ρ approx. 2.5 – 2.6 g/cm ³ |
| Modulus of elasticity (ASTM C-1259): | E approx. 84 – 95 x 10 ³ Mpa |
| Poisson's ratio (ASTM C-1259): | μ approx. 0.25 – 0.26 |
| Knoop hardness (ISO 9385): | HK _{0.1/20} approx. 570 – 680 |
| Bending strength (DIN EN 1288, Part 5, R45): | σ _{bb} approx. 100 – 160 Mpa |

All information is subject to change without prior notice.
For detailed material properties please see material type specific datasheets.

Thermal characteristics

| CTE in different temperature ranges | |
|-------------------------------------|---|
| α (-50 °C; 100 °C) | -0.8 – 0.6 x 10 ⁻⁶ K ⁻¹ |
| α (0 °C; 50 °C) | -0.8 – 0.6 x 10 ⁻⁶ K ⁻¹ |
| α (20 °C; 300 °C) | -0.4 – 0.9 x 10 ⁻⁶ K ⁻¹ |
| α (300 °C; 700 °C) | 0.1 – 1.6 x 10 ⁻⁶ K ⁻¹ |

Thermal conductivity (DIN 51936, ASTM E 1461-01) λ_(90 °C) 1.5 – 1.7 W / (m x K)

Specific heat capacity C_{p(20–100 °C)} 0.80 – 0.85 J / (g x K)

MTG 400 – 800 K

Resistance of the material to temperature differences between a defined hot zone and cold edge of room temperature, without cracking due to thermal stress.

TSR 700 – 820 °C (1,292 - 1,508 °F)

Resistance of the material to thermal shock when the hot material is splashed with cold water at room temperature, without cracking due to thermal stress.

Homogeneous heating of the material

| | |
|--------------------------------|----------------|
| TTL / Short term load (1h) | [°C] 880 – 950 |
| TTL / Continuous load (5000 h) | [°C] 700 – 850 |

Inhomogeneous heating of the material

| | |
|--------------------------------|----------------|
| TTL / Short term load (1h) | [°C] 450 – 750 |
| TTL / Continuous load (5000 h) | [°C] 400 – 560 |

Electrical characteristics

Specific electrical volume resistance (DIN 52326)

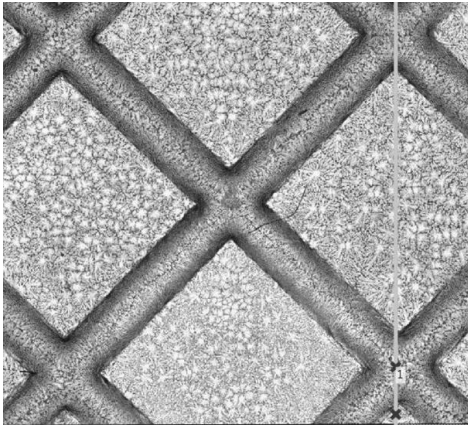
| | | |
|---------------------------|--------|-----------|
| log ρ _(250 °C) | Ω · cm | 6.6 – 7.2 |
| log ρ _(350 °C) | Ω · cm | 5.2 – 5.7 |
| *t _{K100} | °C | 170 – 205 |

*Temperature for a specific electric volume resistivity of 10⁸ Ω·cm

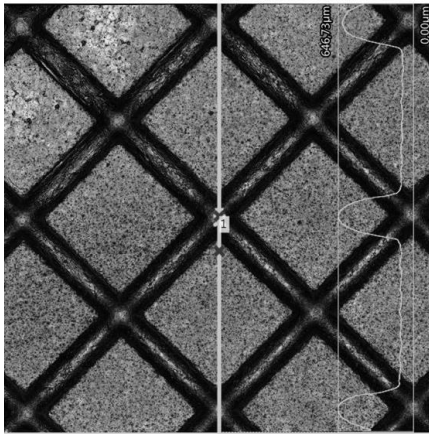
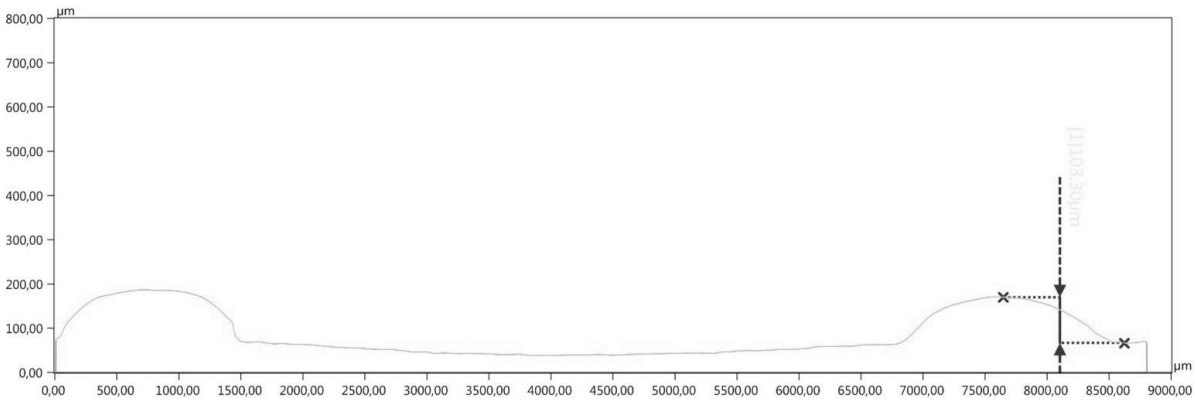
Home Tech
SCHOTT AG
Hattenbergstrasse 10
55122 Mainz
Germany
Phone: +49 (0)6131/66-25431
Fax: +49 (0)3641/28889162
Info.nextrema@schott.com
www.schott.com/nextrema

SCHOTT
glass made of ideas

Anhang N Ermittlung des druckabhängigen Strukturabbildungsvermögens



Prozessdruck: 240 Pa



Prozessdruck: 2.100 Pa

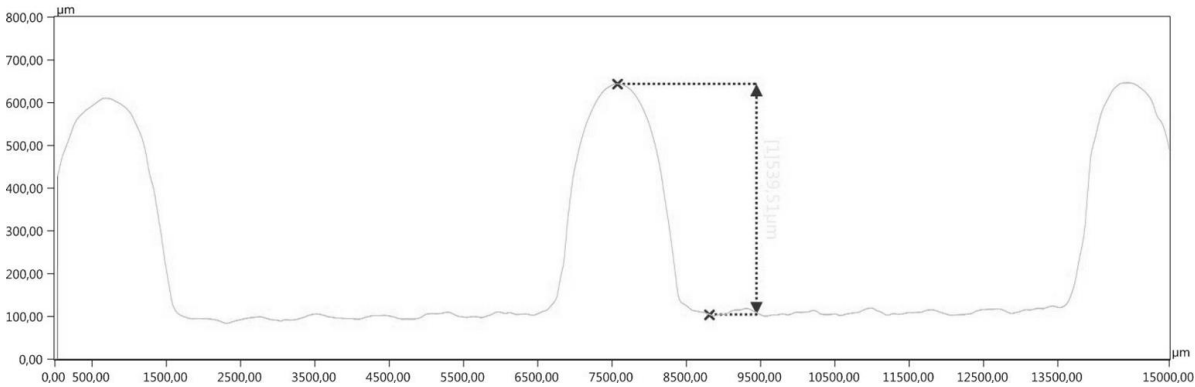
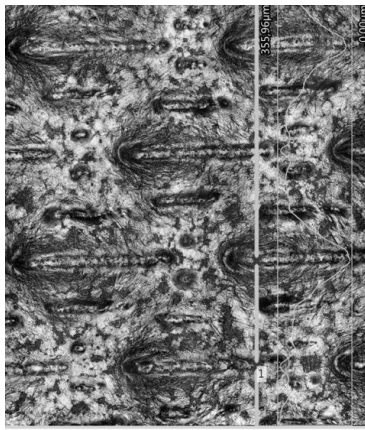
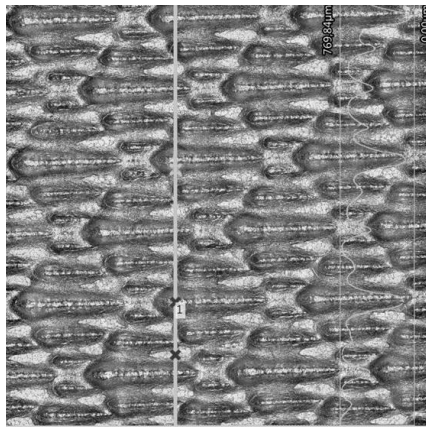
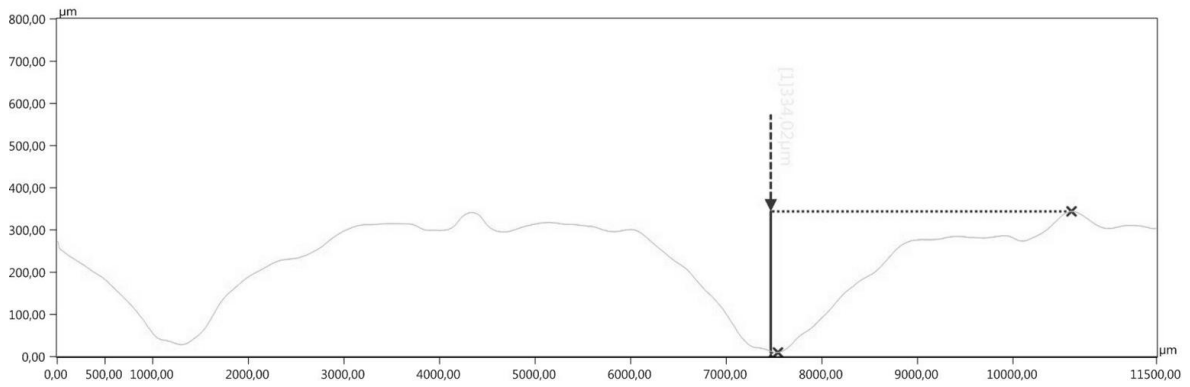


Bild 10.9: Stitching-Aufnahme und Vermessung eines Gussteiles mit der Struktur *Waffel 45°*



Prozessdruck: 240 Pa



Prozessdruck: 2.100 Pa

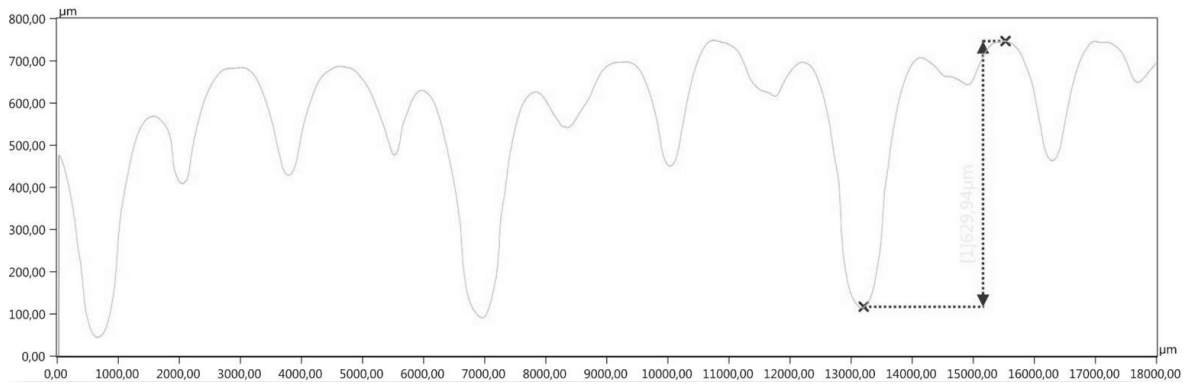
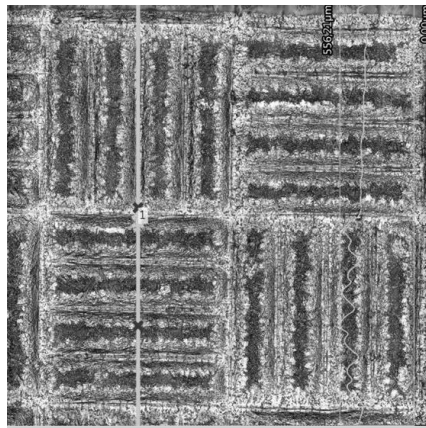
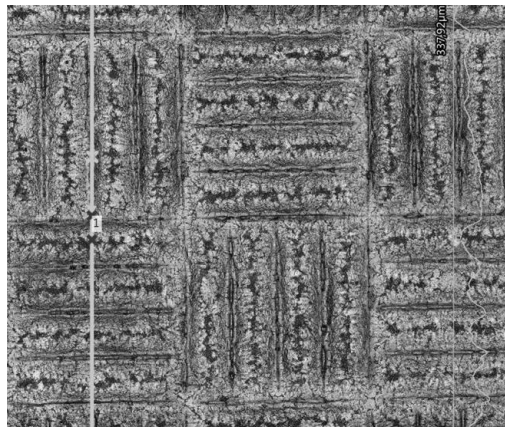
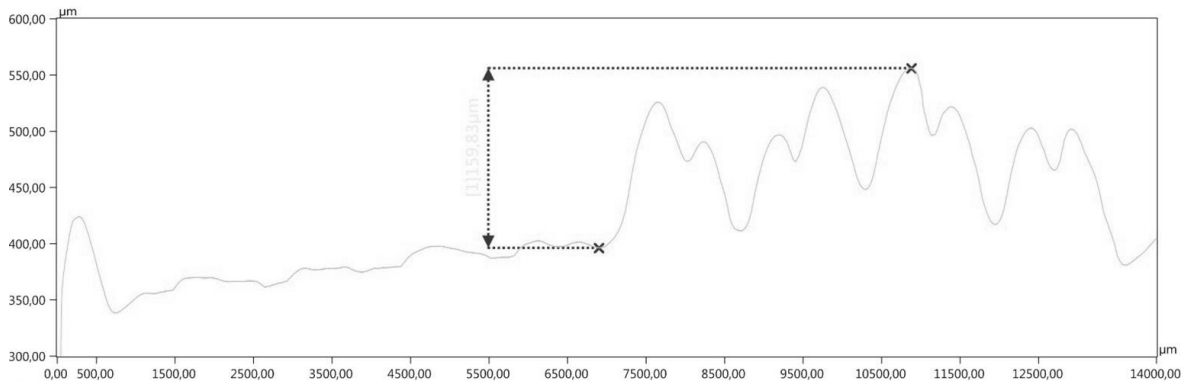


Bild 10.10: Stitching-Aufnahme und Vermessung eines Gussteiles mit der Struktur *Haifisch grob*



Prozessdruck: 240 Pa



Prozessdruck: 2.100 Pa

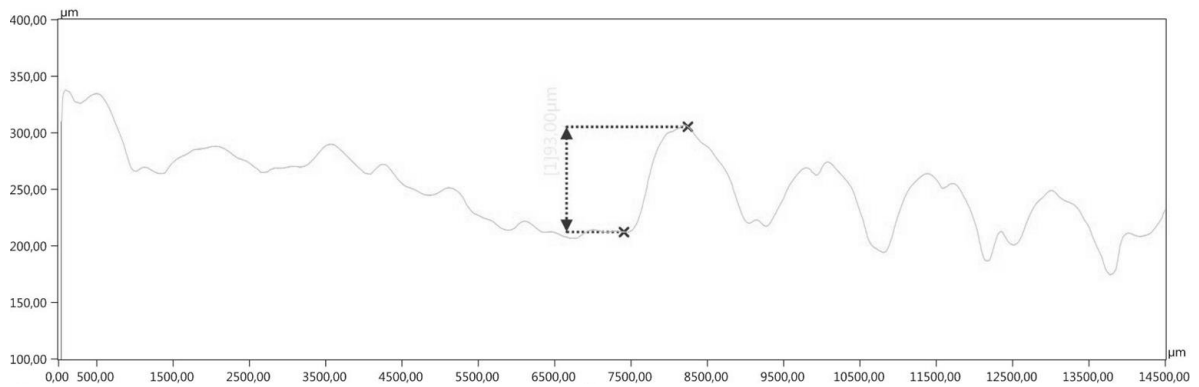
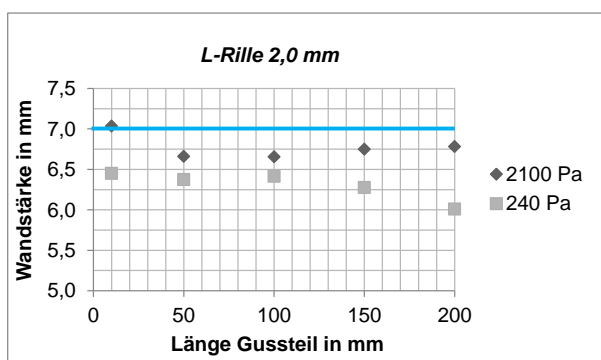
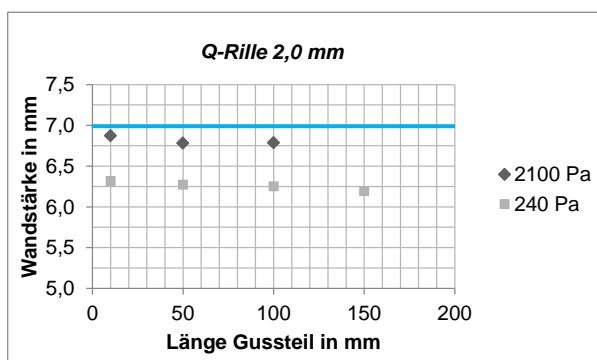
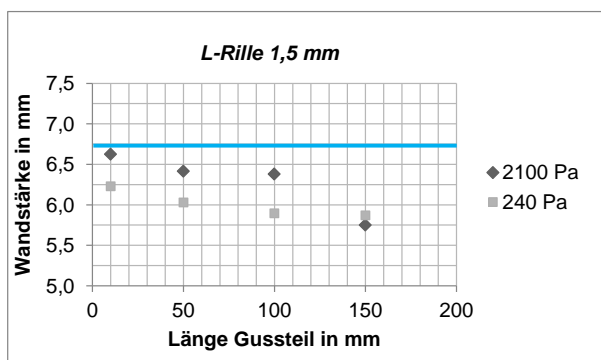
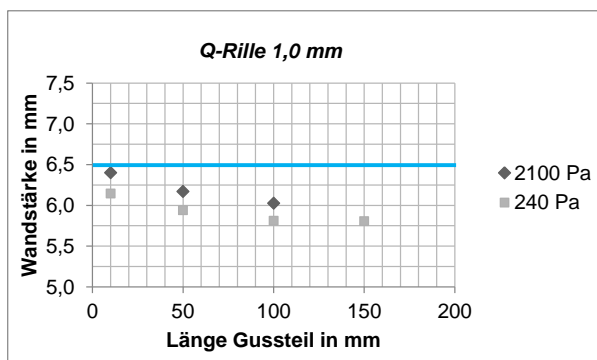
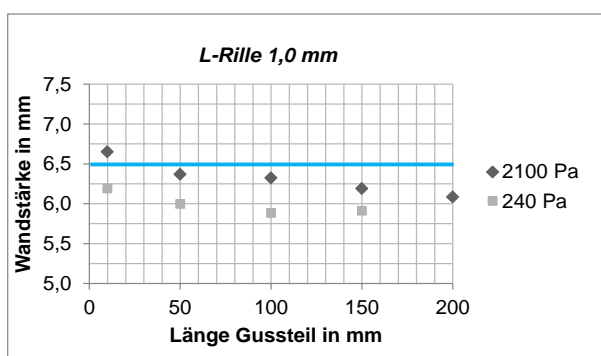
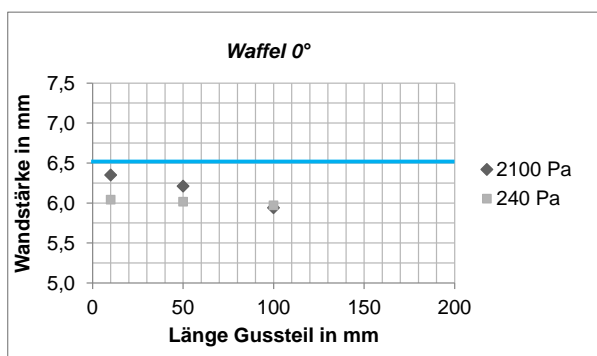
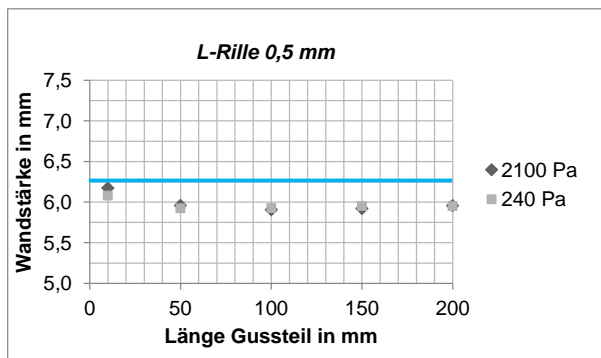
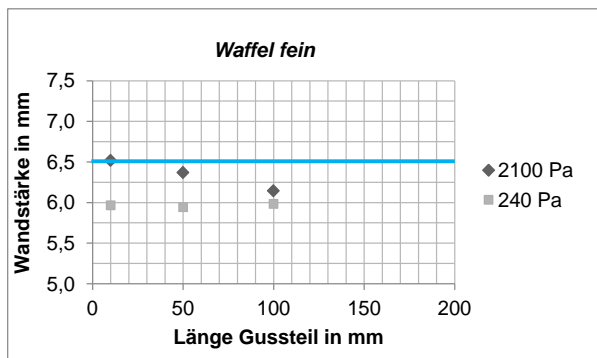
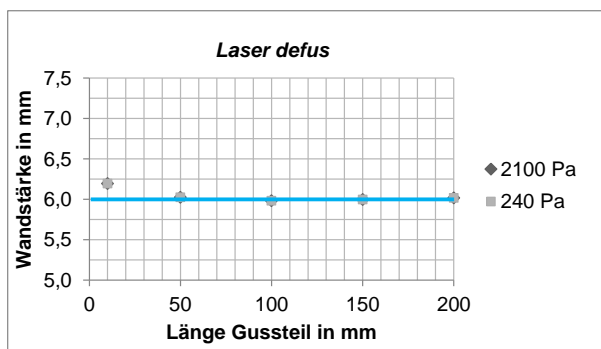
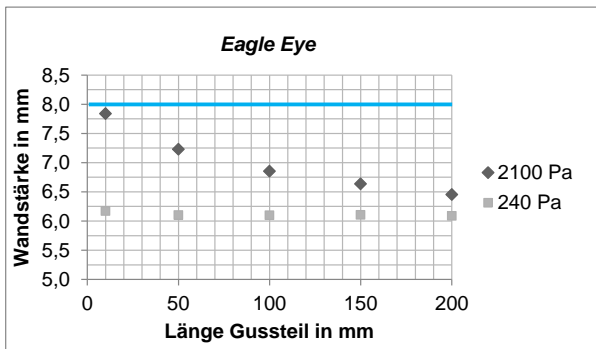
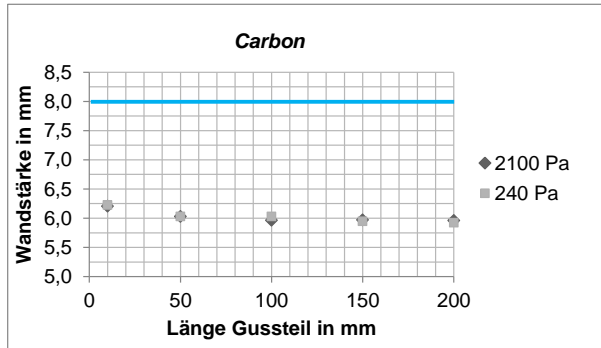
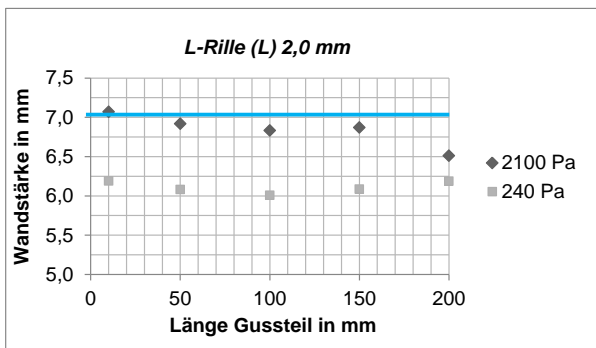
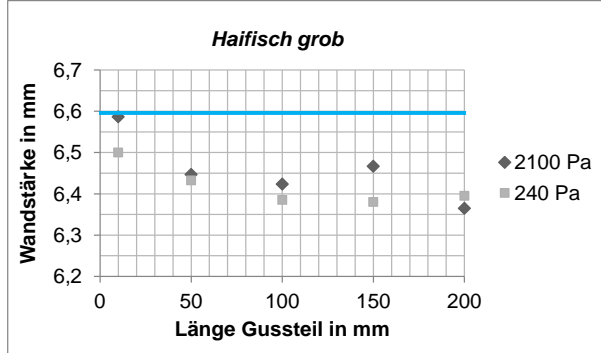
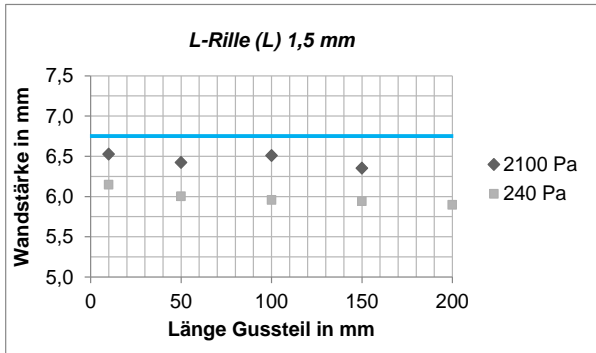
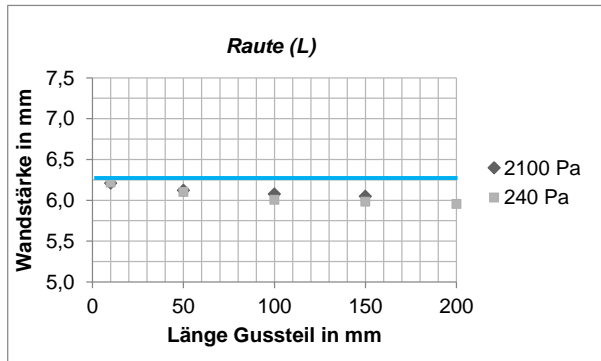
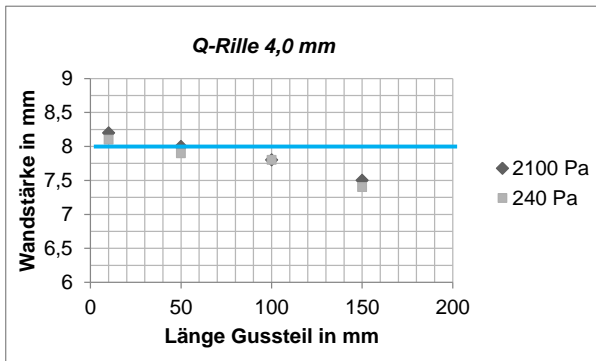


Bild 10.11: Stitching-Aufnahme und Vermessung eines Gussteiles mit der Struktur Carbon

Anhang O Einfluss des metallostatischen Druckes auf das Strukturabbildungsvermögen





Anhang P Formeln zur Berechnung des Krümmungsradius

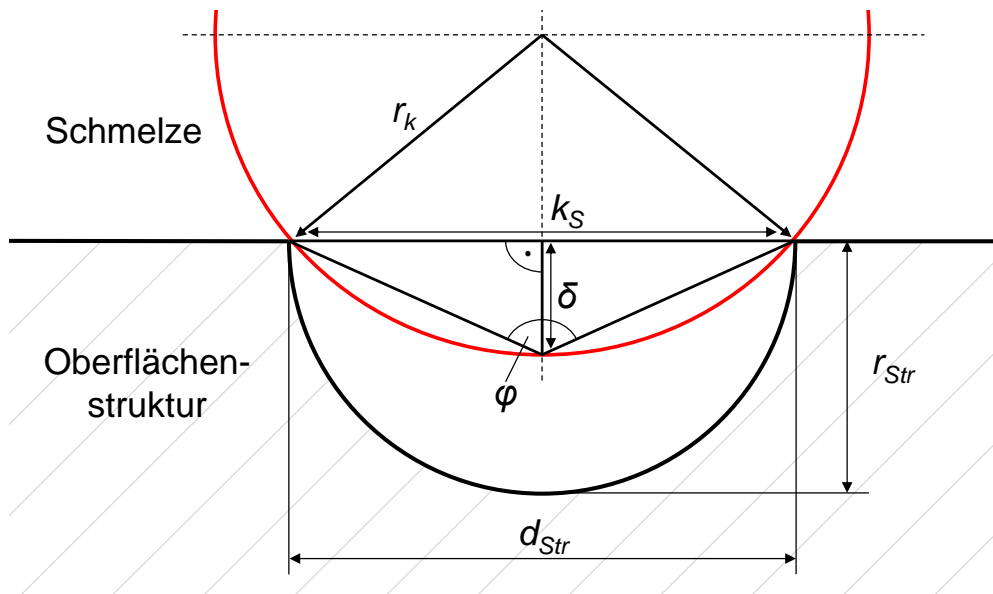


Bild 10.12: Skizze zur Berechnung des struktur- und druckabhängigen Krümmungsradius k_S

$$k_S = 2 \cdot r_k \cdot \sin\varphi \quad (10.1)$$

$$r_k = \frac{k_S}{2 \cdot \sin\varphi} \quad (10.2)$$

$$\varphi = 2 \cdot \left[\tan\left(\frac{0,5 \cdot d_{Str}}{\delta}\right) \right] \quad (10.3)$$

$$r_k = \frac{d_{Str}}{2 \cdot \sin\left\{2 \cdot \left[\tan\left(\frac{0,5 \cdot d_{Str}}{\delta}\right) \right]\right\}} \quad (10.4)$$

Anhang Q Berechnung des Laplace-Druckes im Verhältnis zum Prozessdruck

Tabelle 10.7: Datengrundlage zur Berechnung des Laplace-Druck pro Prozessdruck (240 Pa)

| Metallostatischer Druck 240 Pa | | | | | |
|--------------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------|--|
| Struktur | Struktur- tiefe [mm] | Struktur- breite [mm] | Struktur- füllung [%] | berechneter r_k [mm] | Laplace-Druck pro Prozessdruck [%] |
| <i>glatt</i> | 0,00 | 0,00 | - | - | - |
| <i>Waffel 0°</i> | 0,50 | 1,00 | 5,5 % | 4,6 | 130 % |
| <i>Waffel 45°</i> | 0,50 | 1,00 | 5,0 % | 5,0 | 119 % |
| <i>Waffel fein</i> | 0,50 | 1,00 | 5,0 % | 5,0 | 119 % |
| <i>Golfball 1,0 mm</i> | 0,50 | 1,00 | 1,0 % | 25,0 | 24 % |
| <i>Golfball 2,0 mm</i> | 1,00 | 2,00 | 4,0 % | 12,5 | 47 % |
| <i>Golfball 3,0 mm</i> | 1,50 | 3,00 | 2,5 % | 30,4 | 20 % |
| <i>ccc 1.0</i> | 0,50 | 1,00 | 15,0 % | 1,7 | 349 % |
| <i>ccc 2.0</i> | 1,00 | 2,00 | 33,0 % | 1,7 | 354 % |
| <i>Q-Rille 1,0 mm</i> | 0,50 | 1,00 | 8,0 % | 3,1 | 189 % |
| <i>Q-Rille 2,0 mm</i> | 1,00 | 2,00 | 25,8 % | 2,1 | 287 % |
| <i>Q-Rille 4,0 mm</i> | 2,00 | 4,00 | 90,0 % | 2,0 | 296 % |
| <i>L-Rille (L) 1,5 mm</i> | 0,75 | 1,50 | 5,3 % | 7,1 | 84 % |
| <i>L-Rille (L) 2,0 mm</i> | 1,00 | 2,00 | 11,0 % | 4,6 | 129 % |
| <i>Noppe (L)</i> | 0,50 | 0,25 | 0,2 % | 7,8 | 76 % |
| <i>Raute (L)</i> | 0,50 | 1,25 | 8,0 % | 4,9 | 121 % |
| <i>Haifisch klein</i> | 0,80 | 4,80 | 43,1 % | 8,5 | 70 % |
| <i>Haifisch grob</i> | 0,80 | 6,40 | 58,3 % | 11,2 | 53 % |
| <i>Haifisch grob 90°</i> | 0,80 | 6,40 | 58,3 % | 11,2 | 53 % |
| <i>Laser diffus</i> | 0,25 | 0,18 | 0,4 % | 3,8 | 155 % |
| <i>L-Rille 0,5 mm</i> | 0,25 | 0,50 | 0,8 % | 15,6 | 38 % |
| <i>L-Rille 1,0 mm</i> | 0,50 | 1,00 | 4,0 % | 6,3 | 95 % |
| <i>L-Rille 1,5 mm</i> | 0,75 | 1,50 | 6,7 % | 5,7 | 105 % |
| <i>L-Rille 2,0 mm</i> | 1,00 | 2,00 | 22,5 % | 2,3 | 255 % |
| <i>Eagle Eye</i> | 2,00 | 2,00 | 5,7 % | 4,5 | 133 % |
| <i>Carbon</i> | 2,00 | 1,50 | 2,9 % | 4,9 | 122 % |

Tabelle 10.8: Datengrundlage zur Berechnung des Laplace-Druck pro Prozessdruck (2.100 Pa)

| Metallostatistischer Druck 2.100 Pa | | | | | |
|-------------------------------------|---------------------|----------------------|----------------------|------------------------|------------------------------------|
| Struktur | Struktur-tiefe [mm] | Struktur-breite [mm] | Struktur-füllung [%] | berechneter r_k [mm] | Laplace-Druck pro Prozessdruck [%] |
| <i>glatt</i> | 0,00 | 0,00 | - | - | - |
| <i>Waffel 0°</i> | 0,50 | 1,00 | 56,0 % | 0,6 | 101 % |
| <i>Waffel 45°</i> | 0,50 | 1,00 | 61,5 % | 0,6 | 106 % |
| <i>Waffel fein</i> | 0,50 | 1,00 | 63,4 % | 0,6 | 108 % |
| <i>Golfball 1,0 mm</i> | 0,50 | 1,00 | 1,0 % | 25,0 | 2 % |
| <i>Golfball 2,0 mm</i> | 1,00 | 2,00 | 7,0 % | 7,2 | 8 % |
| <i>Golfball 3,0 mm</i> | 1,50 | 3,00 | 17,3 % | 4,5 | 13 % |
| <i>ccc 1.0</i> | 0,50 | 1,00 | 100,0 % | 0,5 | 119 % |
| <i>ccc 2.0</i> | 1,00 | 2,00 | 85,2 % | 1,0 | 59 % |
| <i>Q-Rille 1,0 mm</i> | 0,50 | 1,00 | 39,7 % | 0,7 | 82 % |
| <i>Q-Rille 2,0 mm</i> | 1,00 | 2,00 | 81,2% | 1,0 | 58 % |
| <i>Q-Rille 4,0 mm</i> | 2,00 | 4,00 | 95,0 % | 2,0 | 30 % |
| <i>L-Rille (L) 1,5 mm</i> | 0,75 | 1,50 | 65,3 % | 0,8 | 73% |
| <i>L-Rille (L) 2,0 mm</i> | 1,00 | 2,00 | 92,1 % | 1,0 | 59 % |
| <i>Noppe (L)</i> | 0,50 | 0,25 | 2,6 % | 0,6 | 98 % |
| <i>Raute (L)</i> | 0,50 | 1,25 | 33,2 % | 1,3 | 47% |
| <i>Haifisch klein</i> | 0,80 | 4,80 | 61,3 % | 0,5 | 113 % |
| <i>Haifisch grob</i> | 0,80 | 6,40 | 65,0 % | 0,7 | 81% |
| <i>Haifisch grob 90°</i> | 0,80 | 6,40 | 65,0 % | 0,7 | 81 % |
| <i>Laser diffus</i> | 0,25 | 0,18 | 1,2 % | 1,3 | 47 % |
| <i>L-Rille 0,5 mm</i> | 0,25 | 0,50 | 26,0 % | 0,5 | 116 % |
| <i>L-Rille 1,0 mm</i> | 0,50 | 1,00 | 76,8 % | 0,5 | 115 % |
| <i>L-Rille 1,5 mm</i> | 0,75 | 1,50 | 69,3 % | 0,8 | 74 % |
| <i>L-Rille 2,0 mm</i> | 1,00 | 2,00 | 84,8 % | 1,0 | 59 % |
| <i>Eagle Eye</i> | 2,00 | 2,00 | 65,2 % | 1,0 | 57 % |
| <i>Carbon</i> | 2,00 | 1,50 | 2,0 % | 7,1 | 8 % |

Anhang R Randbedingungen für das Berechnungsmodell *Erstarrung*

Tabelle 10.9: Randbedingungen für das Berechnungsmodell *Erstarrung*

| Parameter | Größe |
|--|--|
| Kokillenwerkstoff | X38CrMoV5-1 |
| Kokillentemperatur | 350 °C |
| Dichte x spezifische Wärmekapazität (konst.) | 7200 kg/m ³ x 420 J/kg·K |
| Wärmeleitfähigkeit (konst.) | 28,6 W/m·K |
| Wärmeübergangskoeffizient (flüssig/ fest) | 15.000/ 7.500 W/m ² ·K |
| Oberflächenrauheit | Kontaktfläche bzw. Surface Area Multiplier 1,00 bzw. 0,50 |
| Legierung | AISi11Mg |
| Schmelzetemperatur | 600 °C |
| Wärmeleitfähigkeit fest/ flüssig (konst.) | 120 W/m·K / 192 W/m·K |
| spezifische Wärmekapazität (konst.) | 960 J/kg·K |
| Vernetzung | identisch |
| Elementgröße (konst.) | 0.1 mm bis 1,0 mm |
| Elementanzahl | 920.000 bis 1.500.000 |
| Simulationsdauer | bis 100 % Erstarrung |

Anhang S Simulationsergebnisse zum Berechnungsmodell *Erstarrung*

Tabelle 10.10: Ergebnisse zum Berechnungsmodell *Erstarrung* mit 6 mm Gussteilwandstärke

| Gussteilwandstärke 6 mm | | | | |
|--------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|-------------------------|
| Struktur | normiertes Schmelzevolumen | normierte Oberfläche | normierte Erstarrungsdauer | Wärmestrom [J/s] |
| <i>glatt</i> | 100,0 % | 100,0 % | 100,0 % | 108,2 |
| <i>Waffel 0°</i> | 102,4 % | 109,5 % | 101,2 % | 111,0 |
| <i>Waffel 45°</i> | 102,4 % | 109,5 % | 101,2 % | 111,0 |
| <i>Waffel fein</i> | 104,1 % | 114,8 % | 100,9 % | 113,2 |
| <i>Golfball 1,0 mm</i> | 100,0 % | 65,0 % | 135,9 % | 80,2 |
| <i>Golfball 2,0 mm</i> | 101,1 % | 64,0 % | 130,3 % | 93,4 |
| <i>Golfball 3,0 mm</i> | 102,1 % | 63,5 % | 131,2 % | 86,1 |
| <i>ccc 1.0</i> | 106,3 % | 116,0 % | 103,7 % | 112,6 |
| <i>ccc 2.0</i> | 112,9 % | 116,0 % | 110,6 % | 111,3 |
| <i>Q-Rille 1,0 mm</i> | 104,1 % | 119,0 % | 99,8 % | 114,5 |
| <i>Q-Rille 2,0 mm</i> | 107,8 % | 119,0 % | 102,9 % | 115,2 |
| <i>Q-Rille 4,0 mm</i> | 117,4 % | 119,0 % | 112,9 % | 109,4 |
| <i>L-Rille (L) 1,5 mm</i> | 107,9 % | 125,0 % | 119,1 % | 98,8 |
| <i>L-Rille (L) 2,0 mm</i> | 111,2 % | 126,0 % | 121,3 % | 100,1 |
| <i>Raute (L)</i> | 105,9 % | 107,6 % | 124,7 % | 89,3 |
| <i>Noppe (L)</i> | 104,8 % | 114,6 % | 120,8 % | 95,8 |
| <i>Haifisch klein</i> | 109,6 % | 111,4 % | 128,0 % | 93,6 |
| <i>Haifisch grob</i> | 109,6 % | 108,0 % | 130,0 % | 92,3 |
| <i>Haifisch grob 90°</i> | 109,6 % | 108,0 % | 130,0 % | 92,3 |
| <i>Laser diffus</i> | 100,0 % | 100,0 % | 123,6 % | 90,1 |
| <i>L-Rille 0,5 mm</i> | 101,9 % | 120,5 % | 94,4 % | 118,0 |
| <i>L-Rille 1,0 mm</i> | 104,7 % | 124,0 % | 97,3 % | 118,1 |
| <i>L-Rille 1,5 mm</i> | 107,9 % | 125,0 % | 102,3 % | 115,8 |
| <i>L-Rille 2,0 mm</i> | 111,2 % | 126,0 % | 105,7 % | 115,8 |
| <i>Eagle Eye</i> | 100,0 % | 56,0 % | 165,5 % | 66,6 |
| <i>Carbon</i> | 100,0 % | 57,0 % | 160,9 % | 61,6 |

Tabelle 10.11: Ergebnisse zum Berechnungsmodell *Erstarrung* mit 10 mm Gussteilwandstärke

| Gussteilwandstärke 10 mm | | | | |
|---------------------------|----------------------------|----------------------|----------------------------|------------------|
| Struktur | normiertes Schmelzevolumen | normierte Oberfläche | normierte Erstarrungsdauer | Wärmestrom [J/s] |
| <i>glatt</i> | 100,0 % | 100,0 % | 100,0 % | 89,6 |
| <i>Waffel 0°</i> | 101,4 % | 109,5 % | 97,8 % | 84,1 |
| <i>Waffel 45°</i> | 101,4 % | 109,5 % | 97,8 % | 84,1 |
| <i>Waffel fein</i> | 101,4 % | 114,8 % | 97,8 % | 81,1 |
| <i>Golfball 1,0 mm</i> | 100,0 % | 65,0 % | 149,6 % | 93,0 |
| <i>Golfball 2,0 mm</i> | 100,7 % | 64,0 % | 124,9 % | 112,7 |
| <i>Golfball 3,0 mm</i> | 101,3 % | 63,5 % | 124,6 % | 115,1 |
| <i>ccc 1.0</i> | 103,8 % | 116,0 % | 98,7 % | 93,6 |
| <i>ccc 2.0</i> | 107,7 % | 116,0 % | 102,2 % | 93,4 |
| <i>Q-Rille 1,0 mm</i> | 102,5 % | 119,0 % | 96,3 % | 94,5 |
| <i>Q-Rille 2,0 mm</i> | 104,7 % | 119,0 % | 97,7 % | 95,3 |
| <i>Q-Rille 4,0 mm</i> | 110,5 % | 119,0 % | 102,9 % | 92,9 |
| <i>L-Rille (L) 1,5 mm</i> | 104,7 % | 125,0 % | 111,3 % | 83,7 |
| <i>L-Rille (L) 2,0 mm</i> | 106,7 % | 126,0 % | 111,7 % | 85,0 |
| <i>Raute (L)</i> | 103,6 % | 107,6 % | 117,0 % | 79,0 |
| <i>Noppe (L)</i> | 102,9 % | 114,6 % | 113,5 % | 81,1 |
| <i>Haifisch klein</i> | 105,7 % | 111,4 % | 118,1 % | 79,9 |
| <i>Haifisch grob</i> | 105,7 % | 108,0 % | 119,8 % | 78,9 |
| <i>Haifisch grob 90°</i> | 105,7 % | 108,0 % | 119,8 % | 78,9 |
| <i>Laser diffus</i> | 100,0 % | 100,0 % | 117,9 % | 76,4 |
| <i>L-Rille 0,5 mm</i> | 101,1 % | 120,5 % | 92,8 % | 96,7 |
| <i>L-Rille 1,0 mm</i> | 102,8 % | 124,0 % | 93,9 % | 97,1 |
| <i>L-Rille 1,5 mm</i> | 104,7 % | 125,0 % | 96,9 % | 96,1 |
| <i>L-Rille 2,0 mm</i> | 106,7 % | 126,0 % | 98,5 % | 96,4 |
| <i>Eagle Eye</i> | 100,0 % | 56,0 % | 160,9% | 56,1 |
| <i>Carbon</i> | 100,0 % | 57,0 % | 157,9% | 49,0 |

Tabelle 10.12: Ergebnisse zum Berechnungsmodell *Erstarrung* mit 14 mm Gussteilwandstärke

| Gussteilwandstärke 14 mm | | | | |
|---------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|-------------------------|
| Struktur | normiertes Schmelzevolumen | normierte Oberfläche | normierte Erstarrungsdauer | Wärmestrom [J/s] |
| <i>glatt</i> | 100,0 % | 100,0 % | 100,0 % | 78,8 |
| <i>Waffel 0°</i> | 101,0 % | 109,5 % | 98,2 % | 81,0 |
| <i>Waffel 45°</i> | 101,0 % | 109,5 % | 98,2 % | 81,0 |
| <i>Waffel fein</i> | 101,0 % | 114,8 % | 97,8 % | 81,6 |
| <i>Golfball 1,0 mm</i> | 100,0 % | 65,0 % | 147,6 % | 54,4 |
| <i>Golfball 2,0 mm</i> | 100,5 % | 64,0 % | 123,7 % | 64,7 |
| <i>Golfball 3,0 mm</i> | 100,9 % | 63,5 % | 122,6 % | 65,5 |
| <i>ccc 1.0</i> | 102,7 % | 116,0 % | 99,7 % | 81,3 |
| <i>ccc 2.0</i> | 105,5 % | 116,0 % | 100,8 % | 82,4 |
| <i>Q-Rille 1,0 mm</i> | 101,8 % | 119,0 % | 96,5 % | 83,0 |
| <i>Q-Rille 2,0 mm</i> | 103,4 % | 119,0 % | 97,2 % | 83,8 |
| <i>Q-Rille 4,0 mm</i> | 107,5 % | 119,0 % | 100,6 % | 82,6 |
| <i>L-Rille (L) 1,5 mm</i> | 103,4 % | 125,0 % | 109,8 % | 74,7 |
| <i>L-Rille (L) 2,0 mm</i> | 104,8 % | 126,0 % | 109,6 % | 75,6 |
| <i>Raute (L)</i> | 102,5 % | 107,6 % | 115,5 % | 70,4 |
| <i>Noppe (L)</i> | 102,0 % | 114,6 % | 111,8 % | 72,2 |
| <i>Haifisch klein</i> | 104,1 % | 111,4 % | 115,6 % | 71,4 |
| <i>Haifisch grob</i> | 104,1 % | 108,0 % | 116,8 % | 70,5 |
| <i>Haifisch grob 90°</i> | 104,1 % | 108,0 % | 116,8 % | 70,5 |
| <i>Laser diffus</i> | 100,0 % | 100,0 % | 116,9 % | 68,1 |
| <i>L-Rille 0,5 mm</i> | 100,8 % | 120,5 % | 94,0 % | 84,6 |
| <i>L-Rille 1,0 mm</i> | 102,0 % | 124,0 % | 94,1 % | 85,2 |
| <i>L-Rille 1,5 mm</i> | 103,4 % | 125,0 % | 96,4 % | 84,4 |
| <i>L-Rille 2,0 mm</i> | 104,8 % | 126,0 % | 97,4 % | 84,9 |
| <i>Eagle Eye</i> | 100,0 % | 56,0 % | 157,9 % | 50,8 |
| <i>Carbon</i> | 100,0 % | 57,0 % | 178,1 % | 44,5 |

Anhang T Ergebnisse zum strukturabhängigen λ_2 -Wert

Tabelle 10.13: Ergebnisse zu den strukturabhängigen λ_2 -Werten bei 6 mm Gussteilwandstärke

| Struktur | Volumen- änderung [%] | DAS- Änderung im FB [%] | RB unten [μm] | ÜB unten [μm] | FB [μm] | ÜB oben [μm] | RB oben [μm] |
|------------------------|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------------|------------------------------|------------------------------|
| <i>glatt</i> | 0,0 % | 0,0 % | 9,63 | 11,72 | 12,47 | 11,53 | 8,58 |
| <i>Waffel 45°</i> | +2,3 % | -8,3 % | 9,71 | 11,40 | 11,44 | 10,17 | 8,07 |
| <i>Waffel fein</i> | +3,8 % | +4,4 % | 10,91 | 12,69 | 13,02 | 12,26 | 9,22 |
| <i>Golfball 1,0 mm</i> | 0,0 % | +7,9 % | 10,56 | 12,72 | 13,45 | 12,56 | 9,78 |
| <i>Golfball 2,0 mm</i> | 0,0 % | +9,3 % | 10,81 | 12,88 | 13,63 | 12,35 | 10,07 |
| <i>Golfball 3,0 mm</i> | 0,0 % | +2,2 % | 11,07 | 13,02 | 12,74 | 11,08 | 8,74 |
| <i>ccc 1.0</i> | +6,3 % | -3,0 % | 12,03 | 11,97 | 12,10 | 11,63 | 9,21 |
| <i>ccc 2.0</i> | +12,7 % | +7,2 % | 12,58 | 13,49 | 13,37 | 11,93 | 9,49 |
| <i>Q-Rille 1,0 mm</i> | +4,4 % | +1,4 % | 10,14 | 11,77 | 12,65 | 11,98 | 8,02 |
| <i>Q-Rille 2,0 mm</i> | +8,7 % | +12,1 % | 12,06 | 13,59 | 13,98 | 12,82 | 8,62 |
| <i>Noppe (L)</i> | +1,2 % | +17,6 % | 11,01 | 13,91 | 14,66 | 13,61 | 9,62 |
| <i>Haifisch grob</i> | +8,7 % | +1,9 % | 10,38 | 12,17 | 12,71 | 11,32 | 9,03 |
| <i>L-Rille 1,0 mm</i> | +5,5 % | +4,5 % | 11,06 | 13,26 | 13,03 | 11,73 | 8,77 |
| <i>L-Rille 2,0 mm</i> | +11,8 % | +6,7 % | 10,67 | 12,65 | 13,30 | 11,98 | 8,80 |

Anhang U Datengrundlage zur Berechnung des Gesamt- Wärmedurchlasskoeffizienten u_{ges}

Tabelle 10.14: Datengrundlage zur Berechnung des Gesamt-Wärmedurchlasskoeffizienten u_{ges}

| Struktur | Luftspaltdicke [mm] | $A_{Struktur}/A_{Gesamt}$ | u_{ges} [W/m ² K] | normierter u_{ges} |
|---------------------------|------------------------|---------------------------|-----------------------------------|-------------------------|
| <i>glatt</i> | 0,00 | 1,0000 | 3000 | 100 % |
| <i>Waffel 45°</i> | 0,50 | 0,6400 | 2918 | 97 % |
| <i>Waffel fein</i> | 0,50 | 0,3600 | 2756 | 92 % |
| <i>Golfball 1,0 mm</i> | 0,50 | 0,2988 | 2687 | 90 % |
| <i>Golfball 2,0 mm</i> | 1,00 | 0,2787 | 2388 | 80 % |
| <i>Golfball 3,0 mm</i> | 1,50 | 0,2651 | 2120 | 71 % |
| <i>ccc 1.0</i> | 0,50 | 0,1100 | 2140 | 71 % |
| <i>ccc 2.0</i> | 1,00 | 0,1100 | 1663 | 55 % |
| <i>Q-Rille 1,0 mm</i> | 0,50 | 0,3300 | 2724 | 91 % |
| <i>Q-Rille 2,0 mm</i> | 1,00 | 0,3300 | 2495 | 83 % |
| <i>L-Rille (L) 1,5 mm</i> | 0,75 | 0,0600 | 1388 | 46 % |
| <i>L-Rille (L) 2,0 mm</i> | 1,00 | 0,0500 | 1043 | 35 % |
| <i>Raute (L)</i> | 0,25 | 0,0485 | 2022 | 67 % |
| <i>Noppe (L)</i> | 0,25 | 0,1300 | 2572 | 86 % |
| <i>Haifisch klein</i> | 0,60 | 0,0650 | 1618 | 54 % |
| <i>Haifisch grob</i> | 0,60 | 0,0975 | 1933 | 64 % |
| <i>Laser diffus</i> | 0,25 | 0,0575 | 2135 | 71 % |
| <i>L-Rille 0,5 mm</i> | 0,25 | 0,2800 | 2816 | 94 % |
| <i>L-Rille 1,0 mm</i> | 0,50 | 0,1700 | 2413 | 80 % |
| <i>L-Rille 1,5 mm</i> | 0,75 | 0,1200 | 1939 | 65 % |
| <i>L-Rille 2,0 mm</i> | 1,00 | 0,0910 | 1497 | 50 % |
| <i>Eagle Eye</i> | 2,00 | 0,1200 | 1220 | 41 % |
| <i>Carbon</i> | 2,00 | 0,0700 | 826 | 28 % |

Anhang V Untersuchung zur Herstellbarkeit der Struktur *Carbon*

Ziel war herauszufinden, welches Tiefen-Breitenverhältnis mit dem Laserstrahl maximal möglich ist. Hierzu wurde eine Testplatte mit 45 aneinandergereihten Längsrillen angefertigt. Die geometrische Vorgabe der Struktur war wie folgt:

$$b_{n+1} = \sum_{n=0}^{44} 4\mu + 20 \mu m_{n+1} \quad (10.5)$$
$$t = \text{const.} = 2.000 \mu m$$

Die gelaserte Längsrille ist im Querschliff in Bild 10.13 dargestellt. Man erkennt die 45 Vertiefungen, die anschließend Vermessen wurden. Hierbei waren das erreichte Tiefen-Breitenverhältnis und das resultierende Luftvolumen von besonderem Interesse.

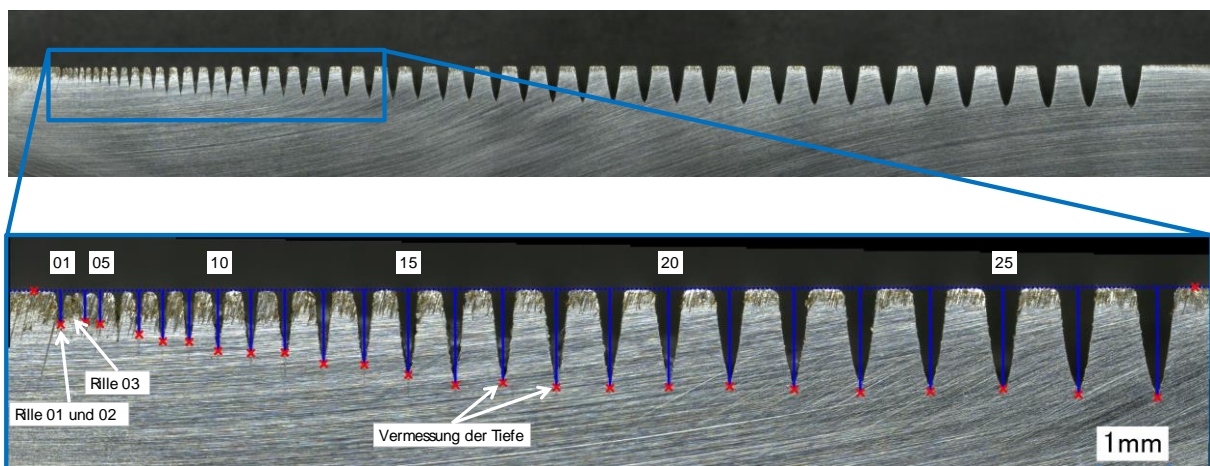


Bild 10.13: Vermessung der Längsrillen im Querschliff unter 50-fache Vergrößerung

Bei den Untersuchungen wurde festgestellt, dass die vorgegebene Breite stets zuverlässig erreicht wurde. Joch wurde die vorgegebene Tiefe von 2,0 mm erst ab Rillen 35 (Genauigkeit Rillentiefe > 85 %) erzielt. Die Auswertung ist in Bild 10.14 grafisch dargestellt.

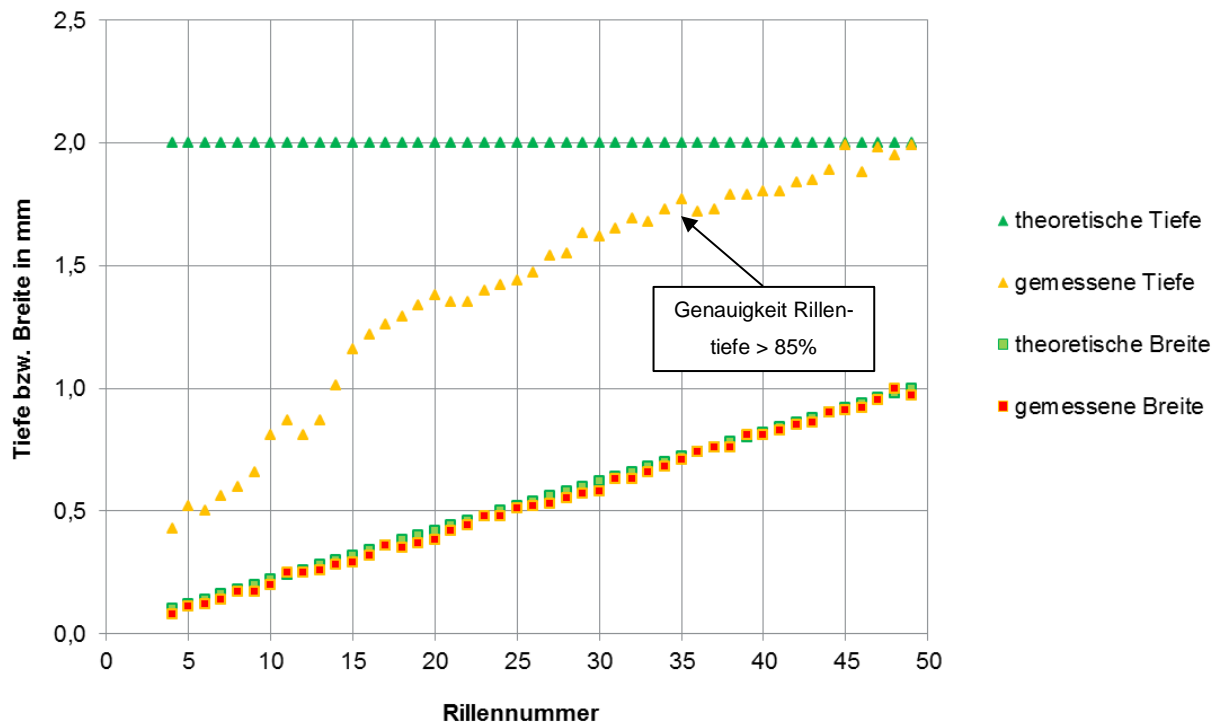


Bild 10.14: Vergleich zwischen theoretischer und erreichter Tiefe und Breite der Rillen

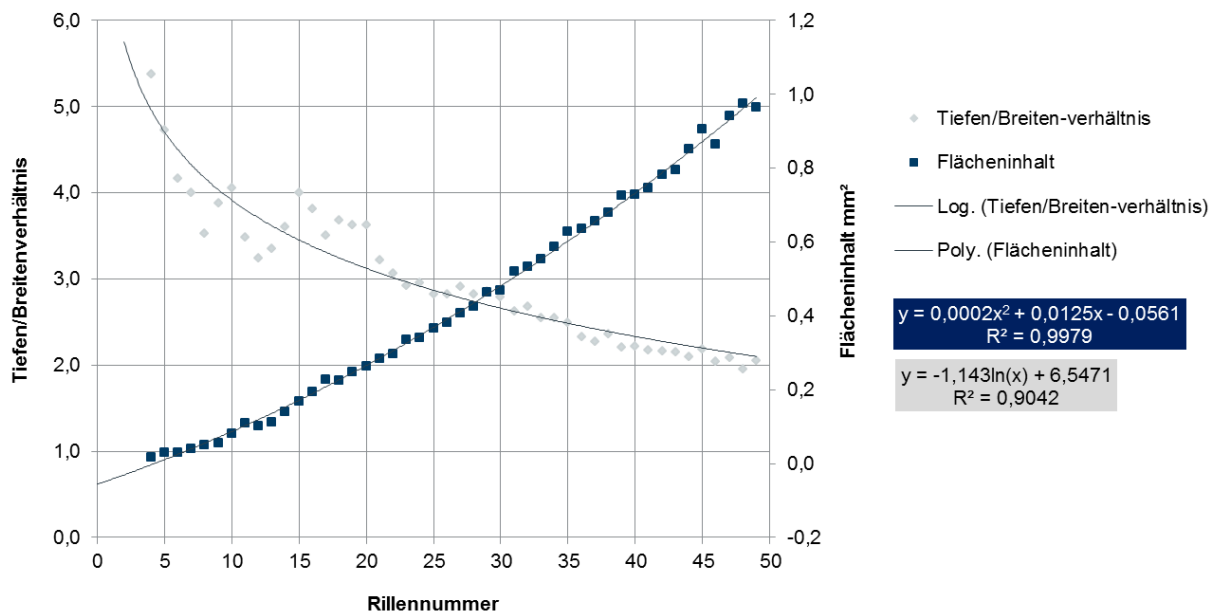


Bild 10.15: Auswertung der Tiefen-Breitenverhältnisse und das resultierende Luftvolumen

Anhang W Strukturspezifisches Verschleißverhalten der Kokillenoberfläche

Für eine erfolgreiche Überführung der neu entwickelten Oberflächenstrukturen in die Großserie ist das Verschleißverhalten bzw. die Strukturlebensdauer von entscheidender Bedeutung. Diese Art der Untersuchung sollte klären, inwieweit der Verschleißzustand der Strukturen die Fließ- und Formfülllänge der Schmelze beeinflusst.

Bei den durchgeführten Versuchen im Labormaßstab wurden die Oberflächenstrukturen *Haifisch grob*, *Noppe (L)* und *Waffel 45°* gezielt verschliffen. Wie sich später der Strukturabtrag in der Großserie äußert, zum Beispiel durch den chemischen Angriff der Schmelze, dem mechanischen Angriff durch das Reinigungsstrahlen oder durch den unsachgemäßen Gebrauch des Gießers, spielte eine untergeordnete Rolle. Entscheidend war die Reduzierung der maximalen Strukturhöhe und deren Auswirkung auf die Fließ- und Formfülllänge im Vergleich zu einer glatten Oberfläche bei einer Gussteilwandstärke von 6,0 mm.

Der Ablauf der Verschleißuntersuchungen war stets identisch. Im Ausgangszustand SD-00 wurden die Oberflächenstrukturen optisch vermessen und anschließend im Gießversuch mit der modularen Kokille erprobt. Anschließend folgten der Strahldurchgang SD-01 und ein erneutes optisches Vermessen, gefolgt vom Gießen. Dieser Vorgang wurde für die Strahldurchgänge SD-02 und SD-03 wiederholt. Für den Verschleiß wurde auf eine Handstrahlanlage der Fa. MHG Strahlanlagen GmbH Modell SMG 25 zurückgegriffen. Das verwendete Strahlgut war Glasbruch mit der Körnung von 200 µm bis 300 µm. Dies ist ein typisches Reinigungsmittel in der Gießereiindustrie. Durch die grobe Körnung und die scharfkantige Struktur ist Glasbruch für ein gutes Reinigungsergebnis jedoch auch für sein erosives Verhalten bekannt. In Bild 10.16 ist das Innenleben der Strahlanlage SMG 25 dargestellt.



Bild 10.16: Versuchsaufbau zum teilautomatisierten Strahlverschleiß mit Glasbruch

Für ein gleichmäßiges Verschleißbild wurden die Strahlversuche teilautomatisiert. Hierfür wurde die zu verschleißende Modulplatte auf ein verfahrbares Gestell montiert und mit einer Geschwindigkeit von 0,5 m/min hin und her bewegt. Da der Strahlkegel bei einem fest definierten Abstand von 10 cm, einem Druck von 5 bar und einem Düsendurchmesser von 10 mm nicht die komplette Modulplattenbreite von 60 mm abdeckte, wurden insgesamt 4 Längsbahnen mit leichter Überlappung pro Modulplatte gestrahlt. Ausgehend von dem gewählten Versuchsaufbau erfolgt der Verschleiß primär in z-Richtung. In Tabelle 10.15 sind alle relevanten Prozessgrößen der Verschleißuntersuchungen zusammengefasst. Bild 10.17 und Bild 10.18 zeigen die Verschleißzustände der drei untersuchten Oberflächenstrukturen *Haifisch grob*, *Noppe (L)*, und *Waffel 45°* nach den jeweiligen Strahldurchgängen, welche nachfolgend detailliert beschrieben.

Tabelle 10.15: Prozessgrößen für den halbautonomen Strahlverschleiß der Oberflächenstrukturen

| Parameter | Prozessgröße |
|-----------------------------------|---|
| Strukturen | <i>Haifisch grob</i> , <i>Noppe (L)</i> , <i>Waffel 45°</i> |
| Strahldurchgänge | 3 (SD-01, SD-02, SD-03) |
| Strahldauer pro Längsbahn | 15 min, 30 min, 30 min |
| Anzahl der Längsbahnen pro Platte | 4 |
| Verfahrgeschwindigkeit | 0,5 m/min |
| Strahlgut | Glasbruch |
| Körnung | 200 µm bis 300 µm |
| Druck | 5 bar |
| Düsendurchmesser | 10 mm |
| Strahlabstand | 10 cm |

Ausgangszustand SD-00

Die Strukturen *Haifisch grob* und *Noppe (L)* wurden per Laserstrahl hergestellt und anschließend einem schonenden Reinigungsstrahlen zur Entfernung des Abbrandes unterzogen und anschließend vermessen. Anhand der Aufnahme erkennt man sehr gut die Details der Oberflächenstrukturen sowie zahlreiche feine Vertiefungen, die sogenannte Laserrauheit, vgl. Bild 10.17. Die gemessenen Strukturhöhen betragen ca. 990 µm bei der Struktur *Haifisch grob* bzw. ca. 600 µm bei der Struktur *Noppe (L)*. Die Tiefe der Struktur *Waffel 45°* betrug 500 µm. Durchgeführte Gießversuche ergaben Fließlängensteigerungen von +113 %, +46 % und +51 %. Die maximalen Gussteilwandstärken ergaben beim *Haifisch grob* ca. 6,5 mm, bei der *Noppe (L)* 6,1 mm und bei der Struktur *Waffel* ca. 6,4 mm.

Strahldurchgang SD-01

Nach dem ersten 15 minütigen Strahldurchgang erkannte man, dass die fertigungsbedingte Laserrauheit ($R_z \approx 100 \mu\text{m}$) bei den Strukturen *Haifisch grob* und *Noppe (L)* entfernt wurde. Die Oberflächen waren nun durch die sogenannte Strahlrauheit ($R_z \approx 20 \mu\text{m}$) gekennzeichnet. Bei der Struktur *Waffel 45°* wurden die Kanten verrundet. Die maximal gemessenen Strukturhöhen betragen ca. 800 µm

beim *Haifisch*, ca. 550 µm bei der *Noppe (L)* und rund 485 µm bei der *Waffel 45°*. Durch den Primärverschleiß in z-Richtung ist auch ein Abtrag des Grundniveaus, also der Bereich zwischen den Strukturerhebungen zu verzeichnen. Bei der Struktur *Noppe (L)* erkennt man, dass sich die Zwischenräume zwischen den einzelnen Erhebungen vergrößerten. Bei den anschließend durchgeführten Gießversuchen ist bei der Struktur *Haifisch grob* ein leichter Rückgang auf +102 %, bei der Struktur *Noppe (L)* eine Verbesserung auf +69 % und bei der Struktur *Waffel 45°* ebenfalls eine leichte Abnahme auf +33 % zu verzeichnen. Die Vermessung der Gussteilwandstärke ergab bei beiden bionischen Strukturen eine Vergrößerung von ca. 0,2 mm und 0,4 mm auf 6,7 mm bzw. 6,5 mm. Bei der Struktur *Waffel 45°* blieb die gemittelte Gussteilwandstärke mit 6,4 mm konstant.

Strahldurchgang SD-02

Nach weiteren 30 Minuten Strahlen sah man bei der Struktur *Haifisch grob*, dass die kleinste Erhebung des Schuppenmusters kaum noch zu erkennen war. Der erneute Abtrag bei der Struktur *Haifisch grob* konnte mit 0,2 mm und bei der Struktur *Noppe (L)* mit 0,1 mm beziffert werden. Durch den Abtrag bei der Struktur *Noppe (L)* vergrößerte sich der Zwischenraum zwischen den Erhebungen von 0,2 mm auf 0,4 mm weiter. Des Weiteren wurde die abgeflachte Halbkugelstruktur der *Noppe (L)* deutlich eingeformt. Durch den Verschleiß ergab sich eine Art Kegelstumpfstruktur. Resultat war eine Reduzierung der Kontaktfläche sowie ein leicht vergrößerter Luftspalt. Die Struktur *Waffel 45°* wurde lediglich weiter verrundet. Beim *Haifisch grob* war ein weiterer Rückgang der Fließlänge auf +78 % und bei der *Noppe (L)* ein weiterer leichter Anstieg auf +83 % zu beobachten. Bei der Struktur *Waffel 45°* konnte ein leichter Anstieg auf +44 % beobachtet werden. Die Vermessung der Gussteilwandstärken ergaben im Mittel 6,8 mm, 6,6 mm und 6,7 mm bei der Struktur *Waffel 45°*.

Strahldurchgang SD-03

Nach dem dritten Strahldurchgang mit weiteren 30 Minuten sind die beiden Strukturen kaum noch erkennbar. Die Strukturvermessung ergibt maximale Höhen von 500 µm und 400 µm. Durch den fortschreitenden Abtrag sind die Strukturspitzen so verschlissen, dass eine Abstützung der Schmelze und eine Luftspaltbildung unmöglich wurden. Die Strukturen *Haifisch grob* und *Noppe (L)* hatten somit ihre Wirksamkeit vollständig eingebüßt. Die resultierenden Fließlängensteigerungen beruhten hauptsächlich auf der Zunahme der Gussteilwandstärke (> 1,0 mm), welche auf den stetigen Abtrag des Grundniveaus zurückzuführen war. Diese These konnte mit den durchgeführten Gießversuchen untermauert werden, vgl. Bild 10.22. Bei der Struktur *Haifisch grob* lag die Fließlängensteigerung bei +72 % und bei der Struktur *Noppe (L)* bei +87 %. Die Gussteilvermessung ergab Wandstärken von 7,1 mm beim *Haifisch grob*, 6,9 mm bei der Struktur *Noppe (L)* und 6,8 mm bei der Struktur *Waffel 45°*.

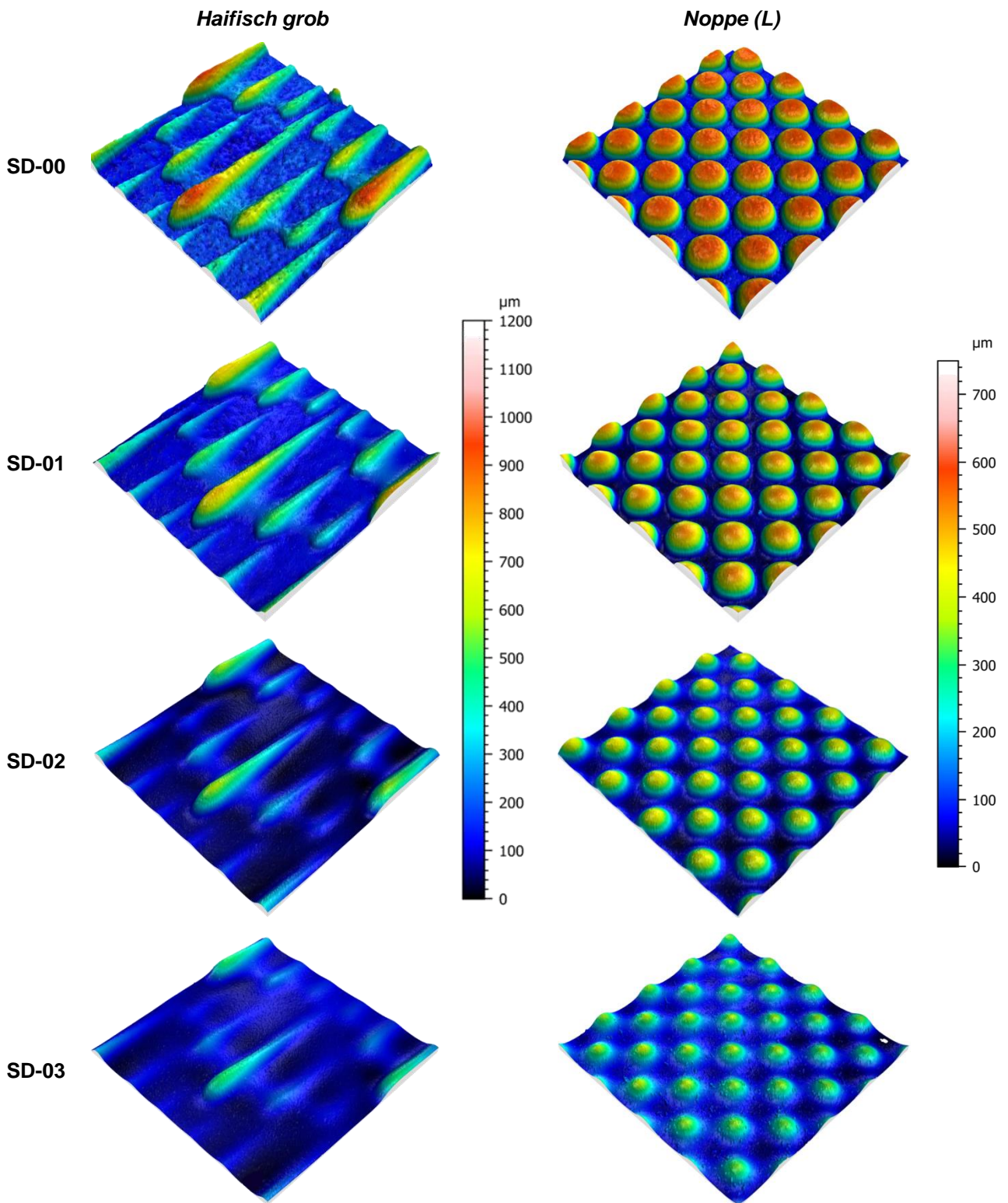


Bild 10.17: Verschleißzustände der Oberflächenstrukturen *Haifisch grob* (links) und *Noppe (L)* (rechts)

Waffel 45°

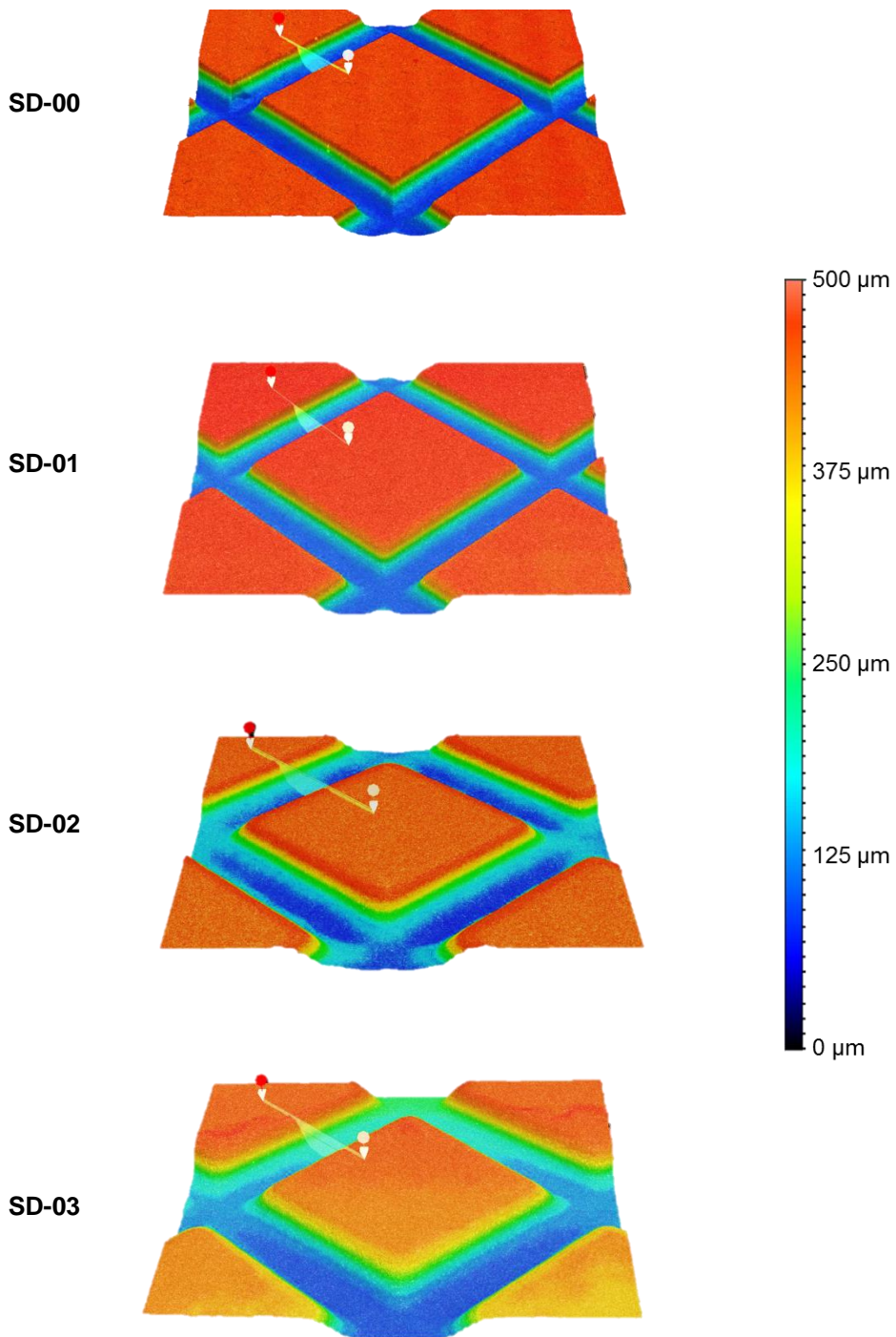


Bild 10.18: Verschleißzustände der Oberflächenstruktur *Waffel 45°*

Die folgenden drei Diagramme verdeutlichen die Auswirkungen des Verschleißes auf die Fließ- und Formfülllänge für die drei untersuchten Strukturen *Haifisch grob*, *Noppe (L)* und *Waffel 45°*. Aufgetragen sind jeweils die verschleißabhängigen Fließ- und Formfülllängen über die maximal gemessene Strukturhöhe. Die Strukturhöhe ist dabei ein Maß für den Strukturverschleiß. Auf der sekundären x-Achse ist eine Abschätzung der möglichen Abgussanzahl (Strukturlebensdauer) für ein reales Kokillengießwerkzeug aufgetragen. Die entsprechende Berechnungsgrundlage kann dem Anhang X entnommen werden.

Die Struktur *Haifisch grob* in Bild 10.19 zeigte mit zunehmendem Verschleiß einen sehr deutlichen Rückgang bei der Fließ- und Formfülllänge, im Vergleich zu einer glatten Oberfläche. Die filigrane Struktur mit ihren feinen Erhebungen war sehr verschleißanfällig. Auch hier kompensierte die Zunahme der Gussteilwandstärke durch den Verschleiß die Fließ- und Formfülllänge geringfügig. Es kann angenommen werden, dass die Strukturlebensdauer weniger als 100.000 Abgüsse beträgt. In Kombination mit einer reduzierten Gussteilwandstärke von 6,0 mm auf 3,5 mm ist davon auszugehen, dass ca. 50.000 Abgüsse erreicht werden können, bevor entsprechende Instandhaltungsmaßnahmen erforderlich werden.

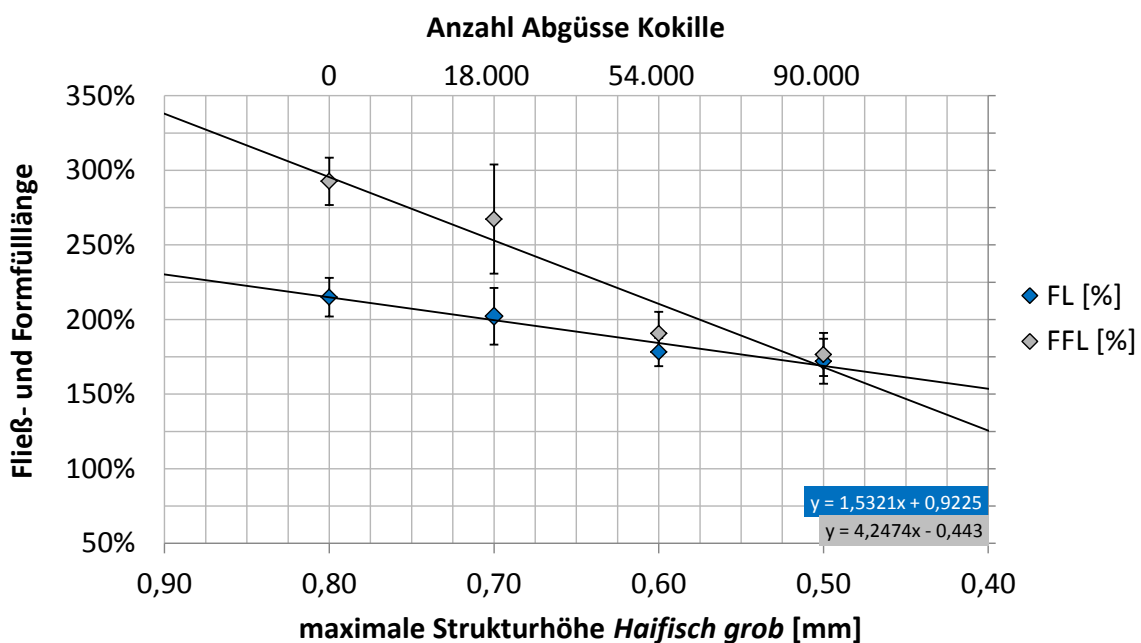


Bild 10.19: Die Fließ- und Formfülllänge der Struktur *Haifisch grob* in Abhängigkeit vom Verschleiß

Die Struktur *Noppe (L)*, Bild 10.20, zeigte hingegen eine stetige Verbesserung der Fließlänge und ein konstantes Ergebnis bei der Formfülllänge. Dies kann mit der Einförmigkeit der Struktur begründet werden. Durch den Verschleiß reduzierte sich die Kontaktfläche zwischen Schmelze und Kokille und der Luftspalt wurde vergrößert. Bei dieser Struktur kann nach der ersten Abschätzung eine Strukturlebensdauer von ca. 150.000 Abguss angenommen werden.

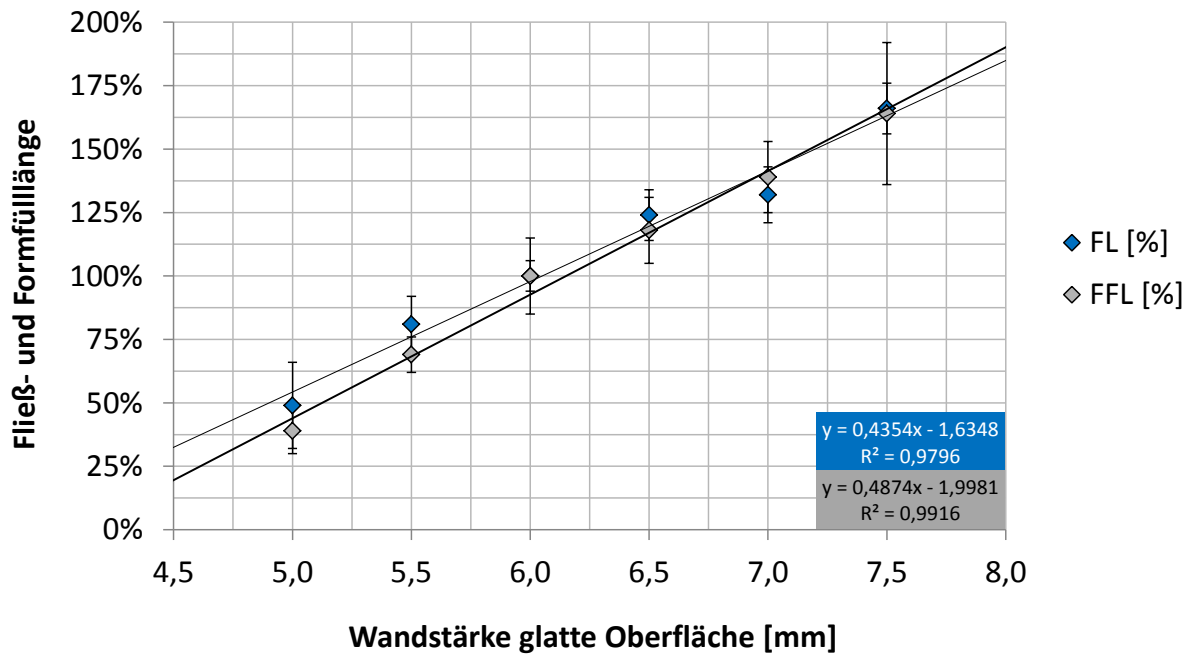


Bild 10.22: Die Fließ- und Formfülllänge in Abhängigkeit von der Wandstärke mit glatter Oberfläche

Die durchgeführten Verschleißuntersuchungen mit den Strahldurchgängen SD-00 bis SD-03 für die drei untersuchten Strukturen deckten ca. 100.000 Abgüsse mit einer Großserienkokille ab. Nachfolgend die Annahmen und die Datengrundlage zur Strukturlebensdauerabschätzung (Anhang X).

Anhang X Lebensdauerabschätzung der Strukturen *Haifisch grob, Noppe (L)* und *Waffel 45°*

Tabelle 10.16: Annahmen zur Lebensdauerabschätzung für die drei Oberflächenstrukturen

| Randbedingungen und Annahmen Modulplatte | | Größe | Formel |
|--|---|--------|-------------------------|
| l_M | Länge Modulplatte [mm] | 350 | - |
| b_M | Breite Modulplatte [mm] | 60 | - |
| A_M | Oberfläche Modulplatte [mm ²] | 21.000 | - |
| t_M | Strahldauer einer Modulplatte [s] | 15 | - |
| t_F | Flächenstrahldauer [s/m ²] | 714 | $t_0 = \frac{t_M}{A_M}$ |

| Randbedingungen und Annahmen HiRa-Kokille | | | |
|---|---|---------|-----------------------------------|
| N_{Guss} | Abgüsse bis Aufbereitung HiRa-Kokille | 300 | - |
| L_{ges} | Lebensdauer der HiRa-Kokille | 100.000 | - |
| SD_L | Strahldurchgänge bis Ende Lebensdauer HiRa-Kokille | 333 | $SD_L = \frac{L_{ges}}{N_{Guss}}$ |
| l_M | Gesamtstrahldauer bis Ende Lebensdauer HiRa-Kokille [s/m ²] | 238.095 | $l_M = SD_L \cdot t_F$ |

| Randbedingungen Dauerstrahlversuche Modulplatte | | | |
|---|---|---------|---|
| t_{SD-00} | Strahldauer SD-00 [s] | 0 | - |
| t_{SD-01} | Strahldauer SD-01 [s] | 900 | - |
| t_{SD-02} | Strahldauer SD-02 [s] | 1.800 | - |
| t_{SD-03} | Strahldauer SD-03 [s] | 1.800 | - |
| t_{FSD-00} | Flächenstrahldauer SD-00 [s/m ²] | 0 | $t_{FSD-00} = \frac{t_{SD-00}}{A_M}$ |
| t_{FSD-01} | Flächenstrahldauer SD-01 [s/m ²] | 42.857 | $t_{FSD-01} = \frac{t_{SD-01}}{A_M}$ |
| t_{FSD-02} | Flächenstrahldauer SD-02 [s/m ²] | 85.714 | $t_{FSD-02} = \frac{t_{SD-02}}{A_M}$ |
| t_{FSD-03} | Flächenstrahldauer SD-03 [s/m ²] | 85.714 | $t_{FSD-03} = \frac{t_{SD-03}}{A_M}$ |
| $t_{FSD-Ges}$ | Gesamt-Flächenstrahldauer [s/m ²] | 214.286 | $t_{FSD-Ges} = \sum_{n=0}^2 t_{FSD-0n+1}$ |

| Strahldurchgänge Modulplatte | aufsummierte Flächenstrahldauer HiRa-Kokille [s/m ²] | Anzahl Gesamt-Strahldurchgänge HiRa-Kokille | Anzahl Abgüsse HiRa-Kokille |
|------------------------------|--|---|-----------------------------|
| SD-00 | 0 | 0 | 0 |
| SD-01 | 42.857 | 60 | 18.000 |
| SD-02 | 128.571 | 180 | 54.000 |
| SD-03 | 214.286 | 300 | 90.000 |

Anhang Y Strukturabhängige Dauerfestigkeit der Gussteile

Aluminiumgussteile unterliegen, speziell im Fahrwerksbereich, hohen dynamischen Belastungen wie Zug-Druck, Biegung und Torsion und bedürfen entsprechender Festigkeits- und Steifigkeitsanforderungen. Durch den Einsatz moderner Oberflächenstrukturen sind zukünftig dünnwandigere, leichtbauoptimierte Gussteile möglich. Dementsprechend ist der Einfluss der Oberflächenstruktur und deren Kerbempfindlichkeit auf die Dauerfestigkeit von Wichtigkeit. Folglich sollte eine Oberflächenstruktur eine möglichst geringe Kerbwirkung auf das Gussteil ausüben.

Um erste Erfahrungen auf dem Gebiet zu sammeln, wurden Dauerschwingversuche mit Gussteilen durchgeführt, welche die einseitige Strukturierung mit *Waffel 45°*, *Noppe*, *Haifisch grob* bzw. *Carbon* aufwiesen. Referenz bildeten die Gussteile mit einer beidseitigen glatten Oberfläche. Pro Struktur wurden fünf Gussplatten hergestellt. Aus diesen wurde per Wasserstrahlschneiden aus dem Randbereich jeweils zwei Proben nach DIN 50125 E5x16x50 herausgetrennt und anschließend eine T6 Wärmebehandlung (Anhang Y) durchgeführt, siehe Bild 10.23. Proben aus dem Kernbereich wurden vermieden, da hier eine deutlich erhöhte Porosität vorlag.

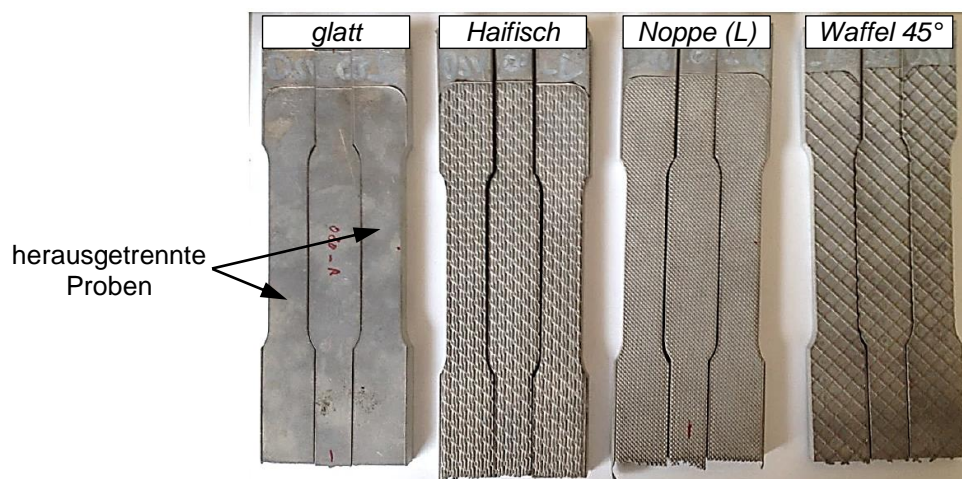


Bild 10.23: Proben für Dauerschwingversuche, *glatt*, *Haifisch grob*, *Noppe (L)* und *Waffel 45°* (v.l.n.r.)

Zur Analyse der Dauerfestigkeit wurden die Proben mit einer hydraulischen Klemmung (300 bar) eingespannt und unterfolgenden Bedingungen geprüft:

- Amplitude: 4,455 kN
- Oberlast: 9,900 kN
- Unterlast: 0,990 kN
- Mittellast: 5,455 kN
- R: 0,100

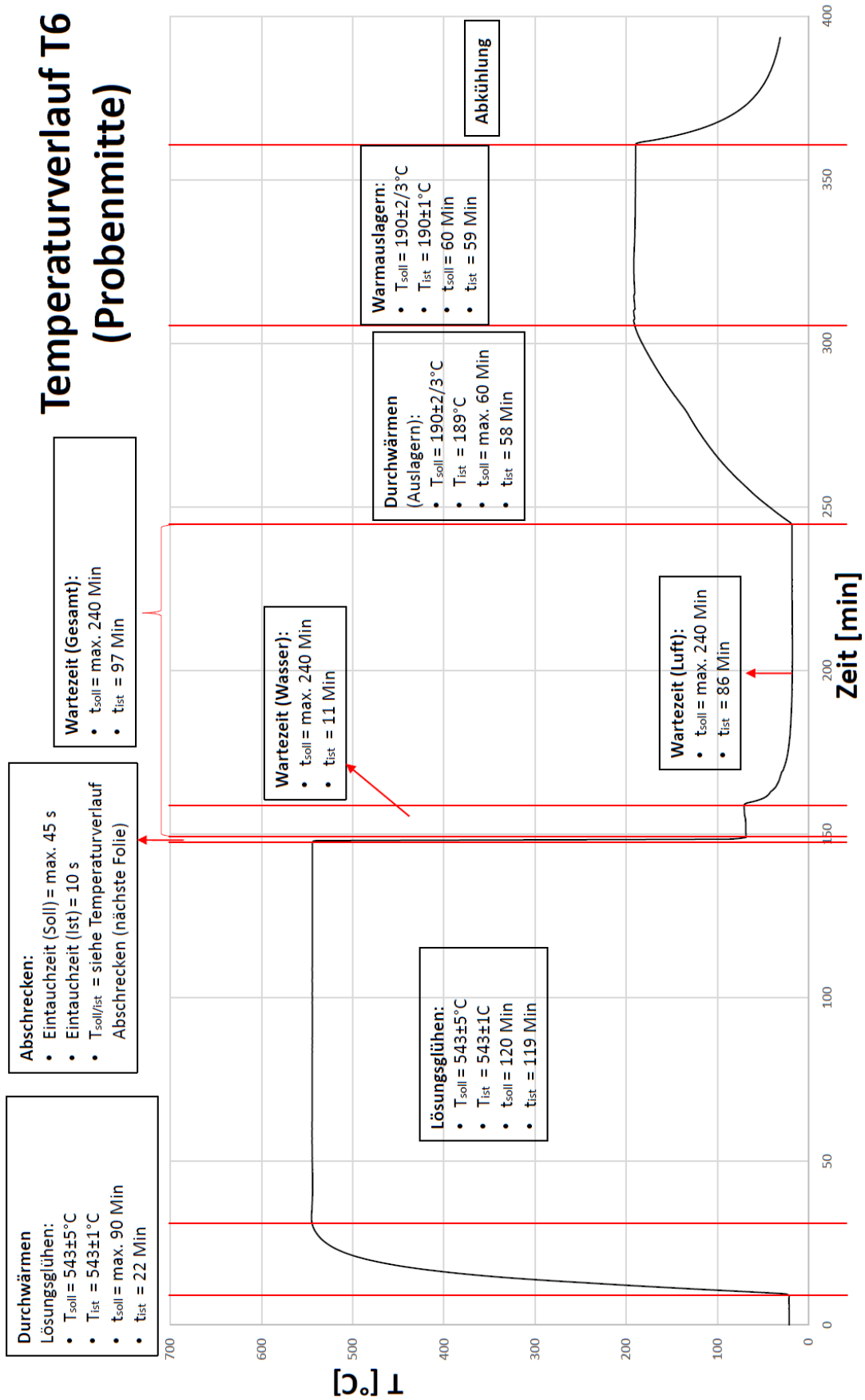
Tabelle 10.17 stellt die erreichten, strukturabhängigen Lastschwingspielzahlen unter Zugschwellbelastung dar.

Tabelle 10.17: Ergebnisse zu den strukturabhängigen Lastschwingspielzahlen

| Struktur | Gussteil- bezeichnung | Schwingspielzahl | Status | Bruchbereich |
|----------------------|----------------------------------|-------------------------|---------------|---------------------|
| <i>glatt</i> | DS_57_R_1 | 1.748.162 | Anriss | Radius |
| <i>glatt</i> | DS_57_R_2 | 2.625.717 | Anriss | Messlänge |
| <i>glatt</i> | DS_58_R_1 | 1.911.101 | Anriss | Schaft |
| <i>glatt</i> | DS_58_R_2 | 3.677.713 | Anriss | Schaft |
| <i>glatt</i> | DS_59_R_1 | 748.909 | Bruch | Messlänge |
| <i>glatt</i> | DS_59_R_2 | 126.634 | Bruch | Messlänge |
| <i>glatt</i> | DS_60_R_1 | 2.093.528 | Bruch | Messlänge |
| <i>glatt</i> | DS_60_R_2 | 10.000.005 | Durchläufer | x |
| <i>glatt</i> | DS_61_R_1 | 3.198.665 | Anriss | Schaft |
| <i>glatt</i> | DS_61_R_2 | 2.663.997 | Bruch | Schaft |
| Mittelwert | | 2.088.270 | | |
| <i>Waffel 45°</i> | DS_05_L_2 | 847.110 | Bruch | Radius |
| <i>Waffel 45°</i> | DS_05_L_1 | 665.295 | Bruch | Messlänge |
| <i>Waffel 45°</i> | DS_03_L_1 | 810.156 | Bruch | Messlänge |
| <i>Waffel 45°</i> | DS_01_L_1 | 806.082 | Bruch | Messlänge |
| <i>Waffel 45°</i> | DS_03_L_2 | 526.747 | Anriss | Radius |
| <i>Waffel 45°</i> | DS_02_L_2 | 861.260 | Bruch | Radius |
| <i>Waffel 45°</i> | DS_04_L_2 | 527.661 | Bruch | Messlänge |
| <i>Waffel 45°</i> | DS_02_L_1 | 351.338 | Bruch | Messlänge |
| Mittelwert | | 674.456 | | |
| <i>Haifisch grob</i> | DS_07_L_1 | 1.221.278 | Anriss | Messlänge |
| <i>Haifisch grob</i> | DS_07_L_2 | 541.696 | Anriss | Radius |
| <i>Haifisch grob</i> | DS_08_L_1 | 4.144.791 | Anriss | Radius |
| <i>Haifisch grob</i> | DS_08_L_2 | 834.378 | Anriss | Radius |
| <i>Haifisch grob</i> | DS_09_L_1 | 1.443.148 | Anriss | Radius |
| <i>Haifisch grob</i> | DS_09_L_2 | 2.894.942 | Anriss | Radius |
| <i>Haifisch grob</i> | DS_10_L_1 | 4.232.514 | Anriss | Radius |
| Mittelwert | | 2.187.535 | | |
| <i>Noppe (L)</i> | DS_08_R_1 | 4.716.256 | Anriss | Radius |
| <i>Noppe (L)</i> | DS_08_R_2 | 1.012.143 | Anriss | Messlänge |
| <i>Noppe (L)</i> | DS_09_R_1 | 926.592 | Anriss | Radius |
| <i>Noppe (L)</i> | DS_09_R_2 | 957.580 | Anriss | Radius |
| <i>Noppe (L)</i> | DS_10_R_1 | 927.409 | Anriss | Messlänge |
| <i>Noppe (L)</i> | DS_10_R_2 | 1.378.828 | Anriss | Radius |
| Mittelwert | | 1.653.135 | | |
| <i>Carbon</i> | DS_12_R_1 | 285.152 | Anriss | Messlänge |
| <i>Carbon</i> | DS_12_R_2 | 170.421 | Anriss | Radius |
| <i>Carbon</i> | DS_13_R_1 | 582.603 | Anriss | Messlänge |
| <i>Carbon</i> | DS_13_R_2 | 175.305 | Anriss | Messlänge |
| <i>Carbon</i> | DS_52_L_1 | 256.707 | Anriss | Messlänge |
| <i>Carbon</i> | DS_52_L_2 | 318.075 | Anriss | Radius |
| <i>Carbon</i> | DS_53_L_1 | 378.670 | Anriss | Messlänge |
| <i>Carbon</i> | DS_53_L_2 | 1.186.064 | Anriss | Schaft |
| Mittelwert | | 419.125 | | |

Die Auswertung zeigt, dass ein Großteil der Proben nicht in der Messlänge versagten. Hierdurch ist eine umfassende Auswertung der Dauerschwingversuche nicht möglich. Dennoch lässt sich eine grobe Tendenz erkennen, siehe errechnete Mittelwerte der Lastschwingspielzahlen. Gussteile mit einer glatten, unstrukturierten Oberfläche ertragen offenbar, unter den definierten Randbedingungen, erhöhte Lastschwingspielzahlen. Für eine fundierte Aussage ist es jedoch zwingend erforderlich, weitere, umfangreiche Untersuchungen durchzuführen.

Temperaturverlauf T6 (Probenmitte)



Ehreenerklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die Hilfe eines kommerziellen Promotionsberaters habe ich nicht in Anspruch genommen. Dritte haben von mir weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen. Verwendete fremde und eigene Quellen sind als solche kenntlich gemacht.

Ich habe insbesondere nicht wissentlich:

- Ergebnisse erfunden oder widersprüchliche Ergebnisse verschwiegen,
- statistische Verfahren absichtlich missbraucht, um Daten in ungerechtfertigter Weise zu interpretieren,
- fremde Ergebnisse oder Veröffentlichungen plagiiert,
- fremde Forschungsergebnisse verzerrt wiedergegeben.

Mir ist bekannt, dass Verstöße gegen das Urheberrecht Unterlassungs- und Schadensersatzansprüche des Urhebers sowie eine strafrechtliche Ahndung durch die Strafverfolgungsbehörden begründen kann. Ich erkläre mich damit einverstanden, dass die Dissertation ggf. mit Mitteln der elektronischen Datenverarbeitung auf Plagiate überprüft werden kann.

Die Arbeit wurde bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form als Dissertation eingereicht und ist als Ganzes auch noch nicht veröffentlicht.

Magdeburg, den 05.07.2018

Ort, Datum

Stephan Knorr, M.Sc.

Declaration of Honor

I hereby declare that I produced this thesis without prohibited external assistance and that none other than the listed references and tools have been used.

I did not make use of any commercial consultant concerning graduation. A third party did not receive any nonmonetary perquisites either directly or indirectly for activities which are connected with the contents of the presented thesis.

All sources of information are clearly marked, including my own publications.

In particular I have not consciously:

- Fabricated data or rejected undesired results
- Misused statistical methods with the aim of drawing other conclusions than those warranted by the available data
- Plagiarized data or publications
- Presented the results of other researchers in a distorted way.

I do know that violations of copyright may lead to injunction and damage claims of the author and also to prosecution by the law enforcement authorities. I hereby agree that the thesis may need to be reviewed with an electronic data processing for plagiarism. This work has not yet been submitted as a doctoral thesis in the same or a similar form in Germany or in any other country. It has not yet been published as a whole.

Magdeburg, den 05.07.2018

Ort, Datum

Stephan Knorr, M.Sc.