



Montanuniversität Leoben

Lehrstuhl für Gießereikunde,
Department für Metallurgie
Vorstand Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.phil. Peter Schumacher



MASTERARBEIT

Thema:

***Untersuchung der Wirkung von lokalem
Nachverdichten im Druckgießverfahren und
Entwicklung einer geeigneten Versuchsform
zur Bestimmung optimaler
Nachverdichtungsparameter***

Ersteller:

David Künstner

Betreuer:

Dipl.-Ing. Dr. mont. Peter Hofer

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.phil. Peter Schumacher



Leoben, im Oktober 2013

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Affidavit

I declare in lieu of oath, that I wrote this thesis and performed the associated research myself, using only literature in this volume.

Leoben, im Oktober 2013

David Künstner

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich herzlich bei Herrn Dipl.-Ing. Dr. mont. Peter Hofer für die stete Bereitschaft in jeder Phase der Betreuung bedanken sowie für die wissensfördernden Diskussionen.

Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. phil. Peter Schumacher danke ich für die konstruktive Zusammenarbeit und die fachliche Betreuung.

Besonders bedanken möchte ich mich beim gesamten Team des Österreichischen Gießerei-Instituts, unter der Leitung von Herrn Dipl.-Ing. Gerhard Schindelbacher, für die Ermöglichung der Abfassung dieser Arbeit und die finanzielle Unterstützung im Rahmen des Projekts COIN durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft.

Meinen Eltern möchte ich diese Arbeit widmen, da sie mir dieses Studium erst ermöglicht haben und mir vor allem in schwierigen Stunden mit Rat und aufbauenden Worten stets zur Seite standen.

Abschließend möchte ich meiner Frau Bernadette aus ganzem Herzen für ihre unermüdliche Motivationsfähigkeit und das entgegengebrachte Verständnis, besonders in der Endphase meines Studiums, danken.

Kurzfassung

Gas- bzw. erstarrungsbedingte Porosität in Druckgussteilen ist zumeist mit einer erheblichen Minderung der mechanischen Kennwerte verbunden. Speziell in konstruktionsbedingten, sprunghaften Waddickenübergängen kommt es zu überhitzten Stellen, sogenannten Hot-Spots, in denen sich vorrangig Mikroporosität in Form von aufgelockertem Gefüge formiert.

Ziel dieser Arbeit ist es, ein Druckgusswerkzeug zu entwickeln, um Maßnahmen zur lokalen Gefügeverbesserung mittels lokaler Nachverdichtung (Squeezen) unter praxisnahen Verhältnissen zu untersuchen. Neben einer fundierten Literaturrecherche wurden radioskopische und metallografische Untersuchungen an direkt bzw. indirekt gesqueezten Bauteilen aus der Industrie, hinsichtlich Gefügebeschaffenheit und Porositätsaufkommen, durchgeführt. Die Auswertung ergab, dass eine Kompensation erstarrungsbedingter Porosität bei Verwendung eines Squeeze-Pins und adäquaten Prozessparametern realisiert werden kann.

Anhand der gewonnenen Erkenntnisse wurde ein Testwerkzeug konzipiert, welches als Doppelform ausgeführt ist, sodass in einem Abguss eine Probe und ein Referenzkörper hergestellt werden können. Die Geometrie des Probenkörpers wurde derart gewählt, dass sich an definierter Position ein Hot-Spot bildet und durch mechanische (und thermische) Maßnahmen dieser Bereich gezielt manipuliert werden kann. Mithilfe numerischer Simulationsmodelle wurde nach mehreren Evolutionsstufen und Optimierungsschritten ein Prototyp-Druckgusswerkzeug gefertigt. In einer ersten Versuchsreihe wurde die Funktionalität des Werkzeugs bestätigt.

Abstract

Porosity in high pressure die casting (HPDC) castings caused by gas or shrinkage during solidification is mostly associated with a substantial reduction of mechanical properties. Particularly in complex castings with sudden wall thickness transitions, so-called hot-spots and micro porosity mainly occur in form of a spongy structure.

The aim of this thesis is to develop a die, enabling to examine methods for local structural improvement by means of squeezing under near industrial conditions. Based on literature research, radiosopic and metallographic investigations were conducted on directly and indirectly squeezed industrial parts, to examine micro structure, mechanical properties and porosity were conducted. The evaluation showed that a compensation of solidification-caused porosity/shrinkage by using a squeeze-pin and appropriate process parameter can be realized.

Based on the industrial observation a HPDC testing die was designed, which is implemented as a double mould, wherein a casting sample and a reference casting can be manufactured. The geometry of the sample is constructed so that a hot-spot forms at a defined position, which can be purposefully manipulated by mechanical (and thermal) measures. After several optimization steps using numeric simulation models a prototype-die was manufactured. In a first test series the functionality of the die was confirmed.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
1.1	Allgemeines	3
1.2	Aufgabenstellung	3
2	Theoretische Grundlagen	4
2.1	Druckguss.....	4
2.2	Erstarrung metallischer Schmelzen.....	8
2.2.1	Erstarrungsmorphologie	8
2.2.2	Speisungsverhalten	12
2.3	Legierungen.....	13
2.3.1	Aluminium-Druckgusslegierungen.....	13
2.4	Gussfehler	16
2.4.1	Formfüllungsbedingte Fehler.....	16
2.4.1.1	Gasporosität	16
2.4.1.2	Kaltfließstelle	18
2.4.1.3	Spritzperlen, Flitter	19
2.4.2	Erstarrungsbedingte Fehler.....	20
2.4.2.1	Schwindungsporosität, (Mikro-)Lunker.....	20
2.4.2.2	Warmriss	22
2.5	Squeezeen – Lokales Nachverdichten	23
3	Experimentelle Methoden	29
3.1	Computertomografie	29
3.1.1	Allgemein.....	29
3.2	Lichtmikroskopie	31
3.3	Rasterelektronenmikroskopie.....	32
3.4	Versuchsdurchführung mit dem Testwerkzeug	33
3.5	Untersuchungen für die Industrie	37
3.5.1	Lenkergehäuse Fa. TCG Unitech.....	37
3.5.1.1	Untersuchte Proben	37
3.5.2	Getriebegehäuse Fa. ADG.....	39
3.5.2.1	Untersuchte Proben	39

4	Ergebnisse	42
4.1	Lenkergehäuse Fa. TCG Unitech.....	42
4.1.1	Computertomografie.....	43
4.1.2	Lichtmikroskopie.....	46
4.1.3	Rasterelektronenmikroskopie	60
4.2	Getriebegehäuse Fa. ADG.....	64
4.2.1	Computertomografie.....	67
4.2.2	Lichtmikroskopie.....	70
5	Entwicklung eines Druckgieß-Versuchswerkzeuges	78
5.1	Konzeption.....	78
5.2	Version 1	81
5.2.1	Ergebnisse der Simulation von Version 1	82
5.3	Version 2	84
5.3.1	Ergebnisse der Simulation von Version 2	85
5.4	Version 3	87
5.4.1	Ergebnisse der Simulation von Version 3	88
5.4.2	Berechnung Verdrängungsvolumen.....	91
6	Versuchsabgüsse mit dem Testwerkzeug.....	93
6.1	Ergebnisse der Versuchsabgüsse.....	94
6.1.1	Thermografie	94
6.1.2	Metallografie	95
7	Zusammenfassung.....	98
7.1	Allgemein.....	98
7.2	Untersuchungen für die Industrie	98
7.2.1	Lenkergehäuse Fa. TCG Unitech.....	98
7.2.2	Getriebegehäuse Fa. ADG.....	99
7.3	Entwicklung eines Druckgieß-Versuchswerkzeuges	100
8	Ausblick.....	101
	Literaturverzeichnis	103
	Abbildungsverzeichnis	106
	Tabellenverzeichnis	112

1 Einleitung

1.1 Allgemeines

Aus wirtschaftlicher Sicht stellt das Druckgießverfahren aufgrund der niedrigen Taktzeiten und des hohen Automatisierungsgrades wahrscheinlich das wichtigste Gießverfahren der Gegenwart dar. Heutzutage lassen sich durch entsprechende Formteilungskonzepte auch sehr komplexe Bauteile in großen Stückzahlen herstellen. Funktionsbedingt festgelegte Bauteilgeometrien mit sprunghaften Wanddickenübergängen und Materialanhäufungen neigen aufgrund der verzögerten Erstarrung in diesem Bereich zu Überhitzung und es bilden sich sogenannte Hot-Spots, in denen Fehlstellen wie (Mikro-) Lunker oder Gasporosität entstehen. Diese Gussfehler mindern die Festigkeitseigenschaften in diesem Bereich erheblich und führen bei höheren Anforderungen an die Bauteilqualität, wie z. B. Druckdichte, unweigerlich zum Ausschuss. Durch ein mechanisches, lokales Nachverdichten, das sogenannte *Squeeze*n, kann Abhilfe geschaffen werden. Dieses zusätzliche Nachverdichten in dem definierten Bereich, realisiert durch eine Squeeze-Einrichtung, erfolgt unabhängig vom allgemeinen Nachdruck und bringt neben der Porositätsminderung auch weitere Möglichkeiten bei der Auslegung und Gestaltung von Druckgussteilen mit sich.

1.2 Aufgabenstellung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, durch eine Literaturstudie den Stand der Technik zu erheben und anhand der gewonnenen Erkenntnisse aus der Untersuchung an Bauteilen aus der Industrie ein Konzept für ein Druckgusswerkzeug zu entwickeln, um Maßnahmen zur lokalen Gefügeverbesserung mittels lokaler Nachverdichtung (Squeezes) unter praxisnahen Verhältnissen zu untersuchen. Die Analyse der Industriebauteile erfolgt neben radioskopischen Bildgebungsverfahren vor allem durch metallografische Untersuchungen. Die Entwicklung des Testwerkzeugs soll durch numerische Simulationen kontrolliert und gegebenenfalls in Evolutionsstufen optimiert werden.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Druckguss

Beim Druckgießverfahren wird eine bestimmte Menge der flüssigen oder halbflüssigen Schmelze durch einen hydraulisch bewegten Gießkolben unter hohem Druck in die Kavität einer metallischen Dauerform gepresst. Anschließend an die Formfüllung wird das (halb-) flüssige Metall mit relativ hohem Nachdruck weiter verdichtet, um der erstarrungsbedingten Schwindung in dickwandigen Bereichen entgegenzuwirken.

Auf dem Sektor des Aluminium-Druckgusses wird fast ausschließlich das horizontale Kaltkammer-Gießverfahren angewandt, da ein Gießen in Warmkammer-Druckgussmaschinen, aufgrund der notwendigen Temperatur und der Eisenlöslichkeit im flüssigen Aluminium, nicht optimal ist. Dies beruht auf der Gegebenheit, dass bei der relativ hohen Gießtemperatur im Warmkammer-Prozess die flüssige Aluminiumlegierung die Eigenschaft besitzt, Eisen aufzunehmen. Mit dem Bestreben immer größere Bauteile von guter Qualität bei gleichzeitig steigender Gießleistung herzustellen, ist das horizontale Kaltkammer-Gießverfahren gegenüber dem Warmkammer-Verfahren klar im Vorteil. Abbildung 2-1 zeigt das Verfahrensschema einer horizontalen Kaltkammer-Druckgussmaschine.

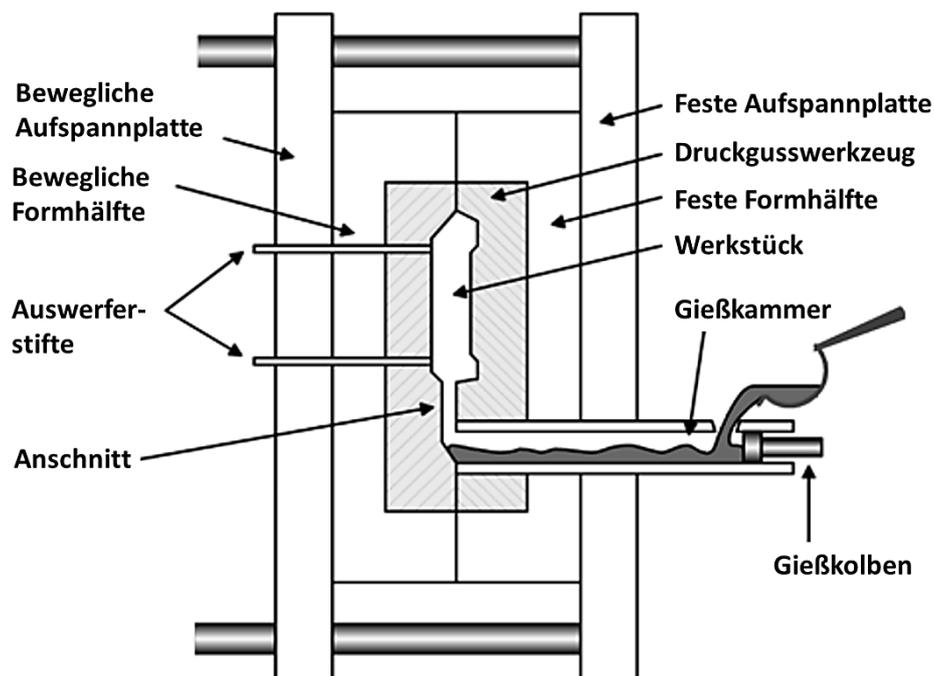


Abbildung 2-1: Schematische Darstellung einer horizontalen Kaltkammer-Druckgussmaschine [1].

Vorteile des Druckgießens gegenüber anderen Gießverfahren sind bessere mechanische und oberflächentechnische Eigenschaften sowie Maßhaltigkeit bei geringem Materialverbrauch und Nachbearbeitung neben relativ geringen Herstellungskosten. Weiters lassen sich sehr komplexe Gussstücke erzeugen, die sich auf andere Weise nicht, oder nur aus Einzelteilen zusammengefügt, realisieren ließen. Von Nachteil ist jedoch die geringe Duktilität von Druckgussteilen, die sich verfahrensbedingt durch den relativ hohen Gasgehalt ergeben kann. Schweißen und Wärmebehandeln ist angesichts der Poren- und Blasenbildung, mit Ausnahme einiger Legierungstypen, nur bedingt möglich.

Porosität, gas- oder erstarrungsbedingt, stellt eines der Hauptprobleme im Druckgießverfahren dar. Sie hängt in erster Linie von der Gestaltung des Gussstückes, der Auslegung der Druckgussform und den Gießparametern ab. Speziell in dickwandigen Bereichen, sprich Materialanhäufungen oder bei sprunghaften Übergängen der Wandstärke, kommt es zu überhitzten Stellen, sogenannten *Hot-Spots*. Dieses resultiert in vermehrter Porosität ($> 1 - 2 \%$), welche eine beträchtliche Minderung der Oberflächenqualität und festigkeitsrelevanten Eigenschaften, wie Zugfestigkeit und Dehnung, bewirkt. Aus diesem Grund sollte im Gussstück eine möglichst geringe Porosität angestrebt werden [1,2].

Um eine optimale Formfüllung und Nachverdichtung zu gewährleisten, ist die Regelung des Gießkolbenantriebs ein zentrales Element im Druckgießverfahren, welches über die Gießeinheit bewerkstelligt wird. Der Bewegungsablauf des Kolbens wird üblicherweise in drei Phasen eingeteilt:

- Vorlauf (1. Phase)
- Formfüllung (2. Phase)
- Nachverdichtung (3. Phase)

In Abbildung 2-2 sind der Weg und die Geschwindigkeit des Gießkolbens sowie der Druckverlauf des flüssigen Metalls bzw. des Gießkolbenantriebes mit den drei Phasen in einer Gießkammer schematisch dargestellt.

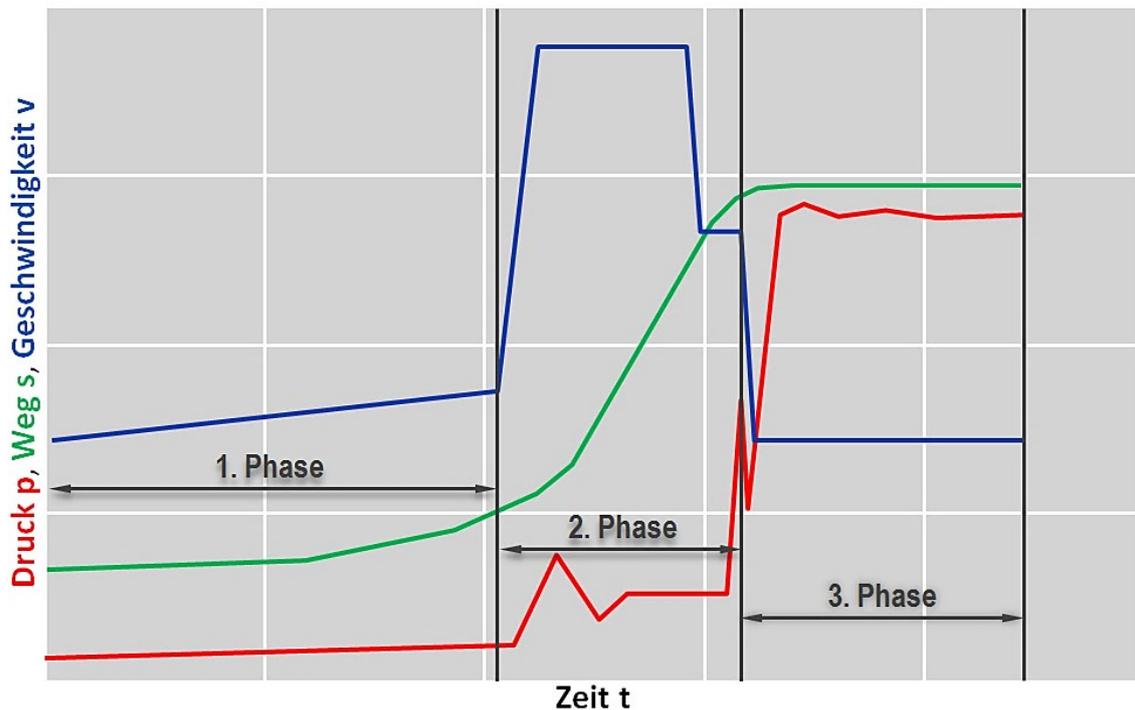


Abbildung 2-2: Weg und Geschwindigkeit des Gießkolbens sowie Druckverlauf im Antriebszylinder einer Kaltkammermaschine während des Gießens, nach [2].

Die erste Phase stellt den Vorlauf dar, welcher durch die Schussauslösung eingeleitet wird. Dabei bewegt sich der Kolben mit konstanter Geschwindigkeit bzw. mit erhöhtem Regelaufwand mit konstanter Beschleunigung langsam vorwärts, um ein Herausschleudern der Schmelze aus der Füllöffnung zu verhindern und das flüssige Metall in der Gießkammer kontrolliert aufzustauen. Hierbei muss auf die Gießkolbengeschwindigkeit v_k geachtet werden, welche nicht zu langsam sein, jedoch auch einen gewissen Wert v_{krit} nicht übersteigen darf. Bei der Bedingung $v_k < v_{krit}$ erreicht die Stauwelle in der Gießkammer nicht den oberen Oberflächenbereich. Eine Lufttasche bildet sich zwischen den beiden Oberflächen durch die Reflexion der Stauwelle am Ende der Gießkammer und vermischt sich dann mit dem flüssigen Metall. Gilt die Beziehung $v_{krit} > v_k$, kommt es zu einem Überschlagen der Stauwelle am oberen Bereich der Gießkammer und schließt demzufolge eine Luftblase in der Schmelze ein. Bewegt sich der Gießkolben gleich schnell wie die Stauwelle ($v_k = v_{krit}$), füllt diese den gesamten Querschnitt der Gießkammer aus und die Luft kann am Ende der Gießkammer über den Entlüftungsweg zum Gießlauf entweichen. Die Ermittlung der kritischen Gießkolbengeschwindigkeit stellt somit eine wesentliche Größe im gesamten Gießprozess dar, um die Lufteinschlüsse im flüssigen Metall zu vermeiden und somit

Porositäten im Gussstück zu minimieren. Abbildung 2-3 zeigt die unterschiedlichen Ausbildungen der Stauwelle in Abhängigkeit der Gießkolbengeschwindigkeit v_k [3,4].

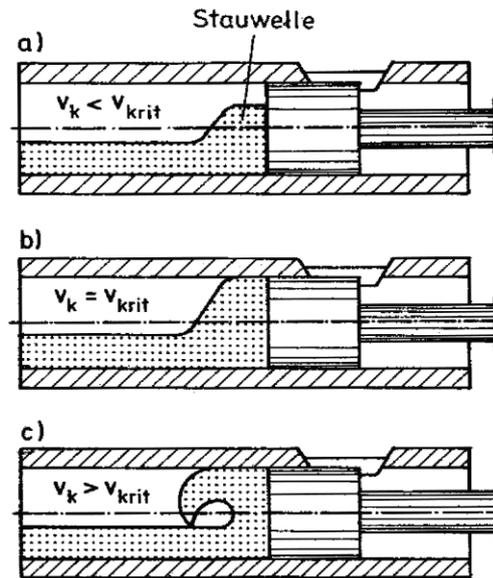


Abbildung 2-3: Schematische Darstellung der Schmelze in der Gießkammer mit steigenden Gießkolbengeschwindigkeiten v_k ($a < b < c$) [4].

In der zweiten Phase kommt es zur Füllung des Formhohlraumes, die als Füll- oder auch Gießhub bezeichnet wird. In dieser Phase beschleunigt der Gießkolben auf eine hohe Geschwindigkeit (< 6 m/s) und presst die aufgestaute Schmelze, mit einer Strömungsgeschwindigkeit von idealerweise 30 bis 60 m/s, durch den Anschnitt in die Kavität. Nach der vollständigen Formfüllung widerfährt dem Gießkolben eine schlagartige Abbremsung auf null. Eine hohe Gießkolbengeschwindigkeit und die dadurch verkürzte Formfüllung kann das Auftreten von inneren und äußeren Gussfehlern mindern. Durch die hohe Kolbengeschwindigkeit und die auftretende Bremswucht entstehen unerwünschte hohe dynamische Druckspitzen im flüssigen Metall, welche eine kurzzeitige, aber hohe Sprengkraft erzeugen, die die Formschließkraft übersteigen kann und zu einem Öffnen der Druckgießform führt. Daraus kann eine Gratbildung bzw. Fahnenbildung und eine Maßabweichung des Gussstücks resultieren, was oft zu Ausschuss führt [2,4].

Die dritte Phase, die Nachdruckphase, dient der Verdichtung des Gussstücks bis zur vollständigen Erstarrung und sollte besondere Aufmerksamkeit erhalten. Ein schneller Druckaufbau (10 bis 30 ms), der bis zu 100 MPa betragen kann, ist nötig um das noch

flüssige bzw. breiartige Metall im Gießlauf und Anschnitt in das der Erstarrungsschwindung unterliegende Gussstück nachzupressen und so eine Verdichtung bzw. eine Speisung zu bewirken. Die Nachspeisung ist jedoch nur solange gegeben, solange der Anschnitt noch nicht erstarrt ist. Mit dem Nachverdichten nimmt die unerwünschte Gas- und Erstarrungsporosität ab, wodurch ein dichtgespeistes Gefüge mit guten mechanischen Festigkeitswerten erreicht wird. Der Nachdruck stellt somit einen wichtigen Prozessparameter dar, da dieser die Voraussetzung für eine geringe Porosität im Gussstück ist und somit die Qualität bestimmt [3,4].

Zusammengefasst stellen eine turbulenzfreie Bewegung der Schmelze in der Gießkammer, die Reduzierung der hohen Gießkolbengeschwindigkeit kurz vor Ende der Formfüllung und eine minimale Übergangszeit von der zweiten auf die dritte Phase beim Nachverdichten die qualitätsrelevanten Punkte beim Füllvorgang im Druckguss dar.

2.2 Erstarrung metallischer Schmelzen

2.2.1 Erstarrungsmorphologie

Bei der Erstarrung von Schmelzen können metallische Kristalle vielfältige Formen annehmen, deren Gestalt durch die Erstarrungsmorphologie beschrieben wird. Sie beschäftigt sich mit zeitlichem und örtlichem Ablauf der Erstarrung. Ist das Erstarrungsverhalten einer Legierung bekannt, kann zumeist auf ihr gießtechnisches Verhalten in der Praxis geschlossen werden.

Beim Abkühlen einer Schmelze von T_L , mit einer Anfangskonzentration c_0 , auf T_S , treten an der Erstarrungsfront, mangels eines Konzentrationsausgleichs zwischen Festkörper und Schmelze, Seigerungserscheinungen auf. Das heißt, vor der Erstarrungsfront wird eine Zone mit hohem Konzentrationsgradienten, einem über das Phasendiagramm konstitutionell zugeordneten Profil der Liquidustemperatur, *vorhergeschoben*. Wenn nun der Gradient der wahren Temperatur (T_x) an der Erstarrungsfront flacher verläuft als jener der Liquidustemperatur, nennt man diesen Effekt konstitutionelle Unterkühlung der Schmelze. In Abbildung 2-4 sind die Zusammenhänge zwischen Konzentrationsunterschied und der instabilen Erstarrungsfront schematisch dargestellt [5,6].

Der Grad der effektiven konstitutionellen Unterkühlung ist abhängig vom Verteilungskoeffizienten $k = \frac{C_S}{C_L}$, vom Diffusionskoeffizienten des Legierungselements im flüssigen Aggregatzustand und vom Temperaturgradienten vor der Erstarrungsfront [7].

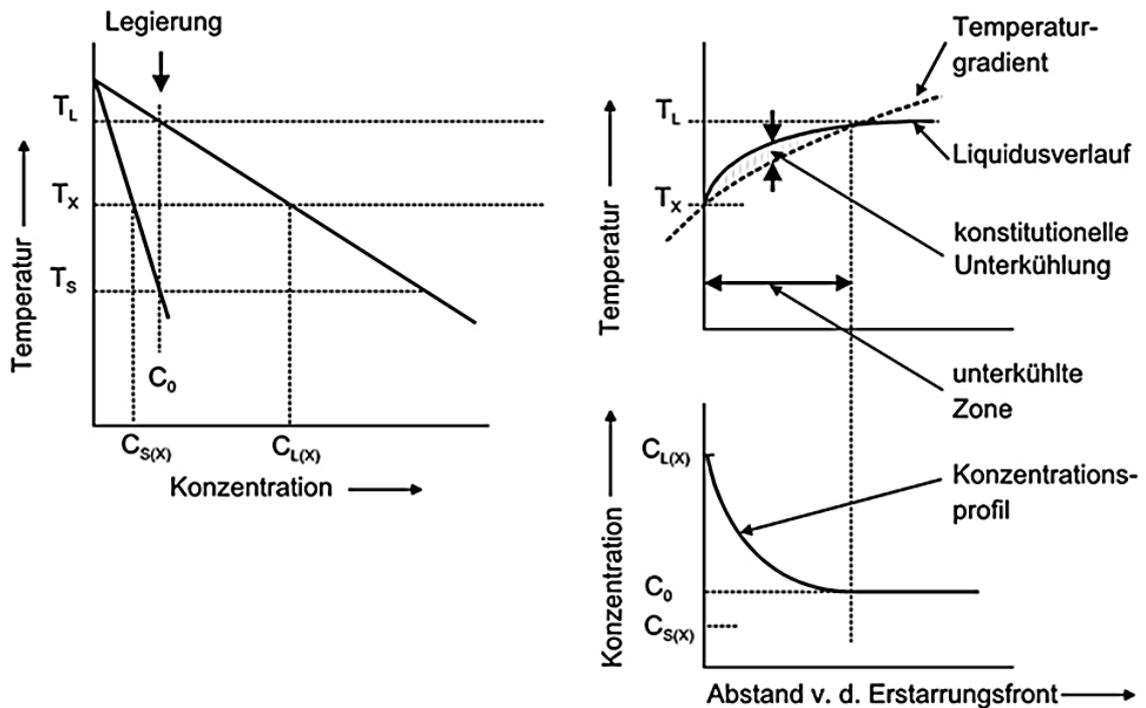


Abbildung 2-4: Entstehung der konstitutionellen Unterkühlung vor der Erstarrungsfront [6].

Die Stärke der Unterkühlung der Schmelzzone ist verantwortlich für die Ausbildung unterschiedlicher Erstarrungsmorphologien. Ist der Gradient der wahren Temperatur gleich oder steiler als jener der Liquidustemperatur, so ist die Erstarrungsfront glattwandig ausgebildet (positiver Temperaturgradient). Bei einer konstitutionellen Unterkühlung ist hingegen die Temperatur der Erstarrungsfront niedriger als die der Schmelze, wodurch sich eine unebene, dendritische Erstarrungsfront ausbildet (negativer Temperaturgradient). Diese reicht bei einer geringen Unterkühlung von zellförmiger, über dendritische (rauwandig) bis hin zu breiiger Erstarrungsform (freie globulitische Kristalle), bei sehr starker Unterkühlung. Die Ausbildung der Erstarrungsfront und der Grad der Unterkühlung sind in Abbildung 2-5 dargestellt [5,7].

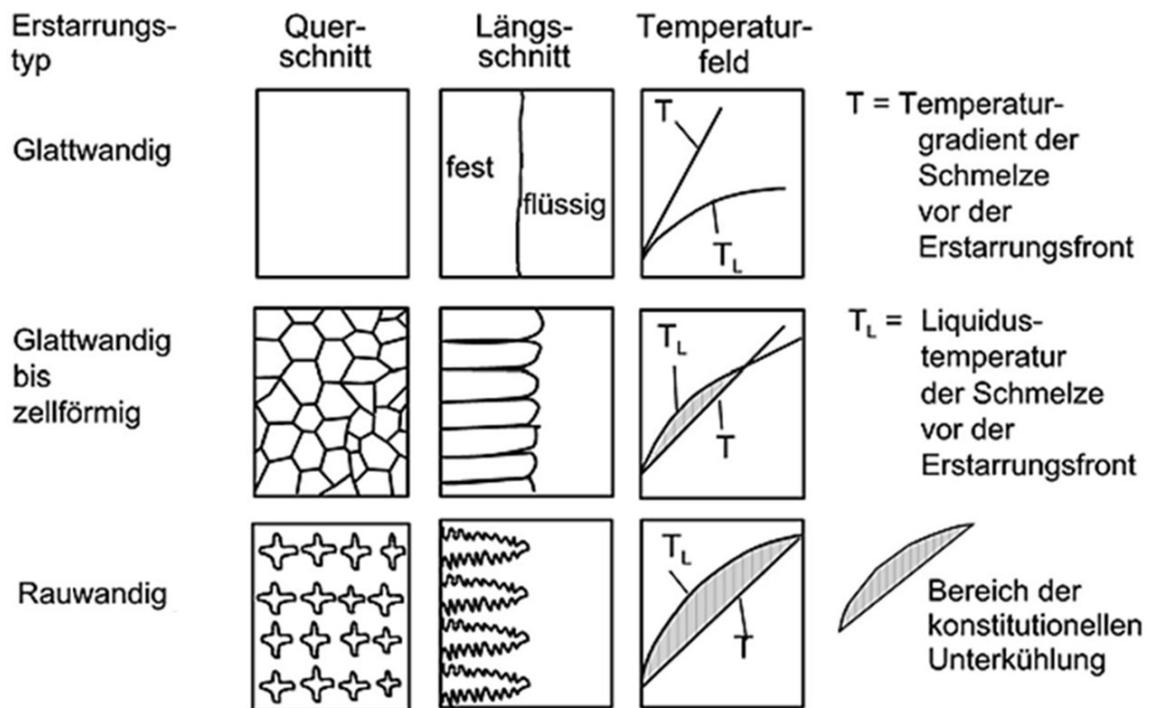


Abbildung 2-5: Einfluss der konstitutionellen Unterkühlung auf die Erstarrungsmorphologie [6].

Kristalle bilden sich entweder an der Formwand (exogen) oder im Inneren der Schmelze (endogen). Die exogen gebildeten Kristallite wachsen stängelig in die Schmelze, aufgrund der Wärmeabfuhr in Richtung der Formwand (gerichtete Erstarrung) und es entsteht, makroskopisch betrachtet, ein Bündel ähnlich orientierter, parallel ausgerichteter Dendriten. Bei endogen gebildeten Kristalliten hingegen kommt es zu einer ungerichteten Abfuhr der Erstarrungswärme in die Schmelze (ungerichtete Erstarrung), wodurch sich die gebildeten Kristallite zu rundlichen Körnern (Globuliten) auswachsen. Die Erstarrung kann wie folgt in fünf verschiedenen Arten (siehe Abbildung 2-6) ablaufen [5,7,8]:

- exogen-glattwandig A_1): Kristalle wachsen kompakt zur Mitte bis die Fronten aufeinanderstoßen; die Grenzflächen zwischen den Kristallen sind glatt.
- exogen-rauwandig A_2): Kristalle wachsen dendritisch zur Mitte bis sie zusammenstoßen; die Grenzflächen zwischen den Kristalliten sind stark zerklüftet.
- exogen-schwammartig A_3): Dendriten durchziehen die Schmelze netzwerkartig; durch die dicker werdenden Seitenarme wird die gesamte Schmelze aufgezehrt.
- endogen-breiartig B_1): Kristalle wachsen globulitisch oder dendritisch, radial in der Schmelze, wodurch diese während der Erstarrung wie ein Brei wirkt.

- endogen-schalenbildend B_2): Kristalle wachsen ebenfalls dendritisch oder kompakt in der Schmelze mit zunehmender Größe nach außen hin; die geringe Beweglichkeit der Kristalle am Rand führt zu einer Randschale.

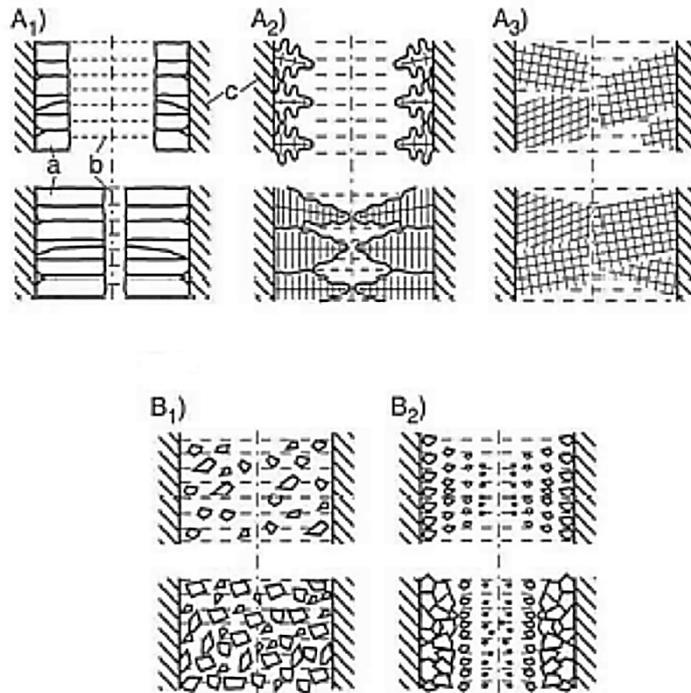


Abbildung 2-6: Typische Arten der Erstarrung: A_1) exogen-glattwandig, A_2) exogen-rauwandig, A_3) exogen-schwammartig, B_1) endogen-breiartig, B_2) endogen-schalenbildend; a) fest, b) flüssig, c) Form [8].

Reine Metalle erstarren glattwandig. Legierungen jedoch ändern ihren Erstarrungstyp mit dem Legierungsgehalt und lokalen Gradienten. Untereutektische Al-Si-Legierungen erstarren üblicherweise nach Typ A_3 (schwammartig), wohingegen Al-Mg-Legierungen endogen, aus einer Mischform der Typen B_1 (breiartig) und B_2 (schalenbildend), erstarren. Neben der Legierungszusammensetzung hat auch die Abkühlgeschwindigkeit einen Einfluss auf die Erstarrungsmorphologie. Bei hohen Abkühlgeschwindigkeiten, wie sie im Druckguss vorliegen, findet eine Verschiebung der Erstarrung in Richtung Typ A_2 (rauwandig) statt. Der Zusammenhang zwischen Abkühlrate ($G \cdot v = const.$) und Gefügemorphologie ($G/v = const.$) ist in Abbildung 2-7 dargestellt. Aus dieser geht hervor, dass sich mit steigender Erstarrungsgeschwindigkeit bzw. abnehmendem Temperaturgradienten, d.h. mit steigender konstitutioneller Unterkühlung, die Mikrostruktur in der Reihenfolge planar, zellulär, dendritisch bzw. globulitisch ändert. Ein

feinkörniges Gefüge kann somit nur durch hohe Abkühlraten erreicht werden [6,7,8,9,10].

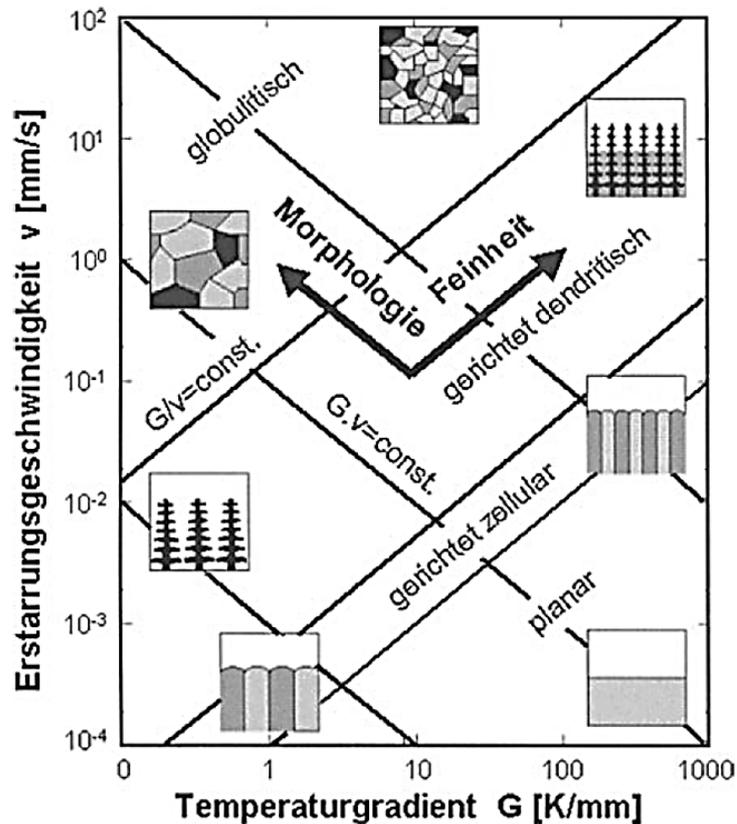


Abbildung 2-7: Einfluss der Erstarrungsparameter auf die Gefügemorphologie und -feinheit [10].

2.2.2 Speisungsverhalten

Der Erstarrungsprozess kann, basierend auf der Durchlässigkeit des Festkörpersnetzwerkes, in vier Phasen eingeteilt werden [11]:

- Flüssigspeisung: Flüssig- (f_L) und Festanteil (f_S) kann sich frei bewegen.
- Massenspeisung: f_S steigt und die verbleibende Schmelze muss durch das gebildete Dendritennetzwerk fließen. Es bildet sich ein Druckgradient in dem schwammartigen Netzwerk aus, welches aber noch eine genügend hohe Permeabilität bietet, um tieferliegende Bereiche zu speisen.
- Interdendritische Speisung: mit weiter steigendem f_S -Anteil sinkt die Permeabilität des Netzwerkes, wodurch sich abgeschlossene Restschmelzebereiche bilden können, in denen sich Poren formieren bzw. Warmrisse durch die Erstarrungskontraktion und die mangelnde Nachspeisung entstehen.

- Festkörperspeisung: bei Werten von $f_s > 0,9$ findet kein Nachspeisen mehr statt und die Erstarrungskontraktion kann nur mehr durch Festkörper-Kriechen kompensiert werden.

Während der Phase der interdendritischen Speisung bzw. im breiigen, halbflüssigen Zustand der Schmelze können meist effizient Gussfehler im Bauteil verhindert werden. Bezogen auf den jeweiligen Erstarrungstyp (siehe Kap.2.2.1) einer Legierung kann mit einer sinkenden Wirkung des Speisungsvermögens in der Folge exogen-glattwandig → exogen-rauwandig → endogen-schalenbildend → endogen-breiartig → exogen-schwammartig gerechnet werden. Ein gutes Speisungsverhalten bringt daher eine gute Gießbarkeit und eine geringe Anfälligkeit für Warmrisse mit sich [11,12].

2.3 Legierungen

Für das horizontale Kaltkammer-Druckgießverfahren finden hauptsächlich Aluminium- und Magnesiumlegierungen Anwendung. Einen großen Einfluss auf die Qualität des Gussstücks haben die chemischen Eigenschaften und die Gefügestruktur der verwendeten Druckgusslegierung. Jene soll neben einer guten Gießbarkeit bzw. einem guten Formfüllvermögen und nicht zu hohen Schmelzetemperaturen auch hohe mechanische Festigkeitswerte und gute Korrosions- und Verschleißbeständigkeit aufweisen [13].

2.3.1 Aluminium-Druckgusslegierungen

Hier kommen in erster Linie Legierungen vom Typ Al-Si, Al-Si-Cu und Al-Mg zum Einsatz, wobei in dieser Arbeit nur das Legierungssystem vom Typ Al-Si-Cu betrachtet wird. Das wichtigste Legierungselement bei Aluminium-Druckgusslegierungen stellt Silizium dar, da es die Gießbarkeit wesentlich erhöht. Eutektische Legierungen mit Siliziumgehalten zwischen 11 und 13 % (siehe Abbildung 2-8) werden wegen ihrer hohen Fließfähigkeit vor allem für dünnwandige Bauteile verwendet. Durch die im Druckguss vorherrschenden hohen Erstarrungsgeschwindigkeiten entsteht eine feine veredelungsähnliche Gefügestruktur, was eine Veredelung mit Strontium, mit Ausnahme von duktilen Druckgusslegierungen, meist überflüssig macht.

In Abbildung 2-8 ist ein Teilbereich aus dem Al-Si-Phasendiagramm, mit unterschiedlicher Gefügeausbildung der Legierung bei steigendem Si-Gehalt dargestellt.

Durch Kupfergehalte ab 1 % in Al-Si-Cu-Legierungen steigen vor allem Festigkeit, die Gießbarkeit, die Bearbeitbarkeit und die Warmfestigkeitseigenschaften. Weiters wird der Einfluss der Erstarrungsschrumpfung gesenkt, wodurch druckdichte Gussstücke erzeugt werden können. In aggressiven Umgebungsmedien mindert Kupfer jedoch die Korrosionsbeständigkeit.

Da Aluminium die Formoberfläche durch Anschweißungen und Kleben stark angreift, weisen Aluminium-Druckgusslegierungen üblicherweise einen Eisengehalt von 0,3 % auf, wodurch die Formstandzeit verlängert wird und sich die Gussteiloberfläche verbessert. Eisen gilt grundsätzlich in Gusslegierungen jedoch als Verunreinigung, da es bei höheren Gehalten, ab 0,8 %, die Bruchdehnung durch die Bildung von β -Al₅FeSi Nadeln oder Plättchen stark mindert. Durch Zugabe von Mangan, welches eine ähnliche Wirkung hinsichtlich der Reduzierung der Klebeneigung besitzt, kann in Al-Si und Al-Si-Cu-Legierungen der schädigende Einfluss des Eisens gemindert werden [1,2,14].

Eine typische und universell eingesetzte Druckgusslegierung ist die EN AC-46000 [Al-Si9Cu3(Fe)], auch Al226D genannt. Wegen ihrer sehr guten Gießbarkeit können komplizierte Maschinen- und Motorenteile, Kurbelgehäuse und, aufgrund der Warmfestigkeit durch den Kupferanteil, Kurbelgehäuse gegossen werden.

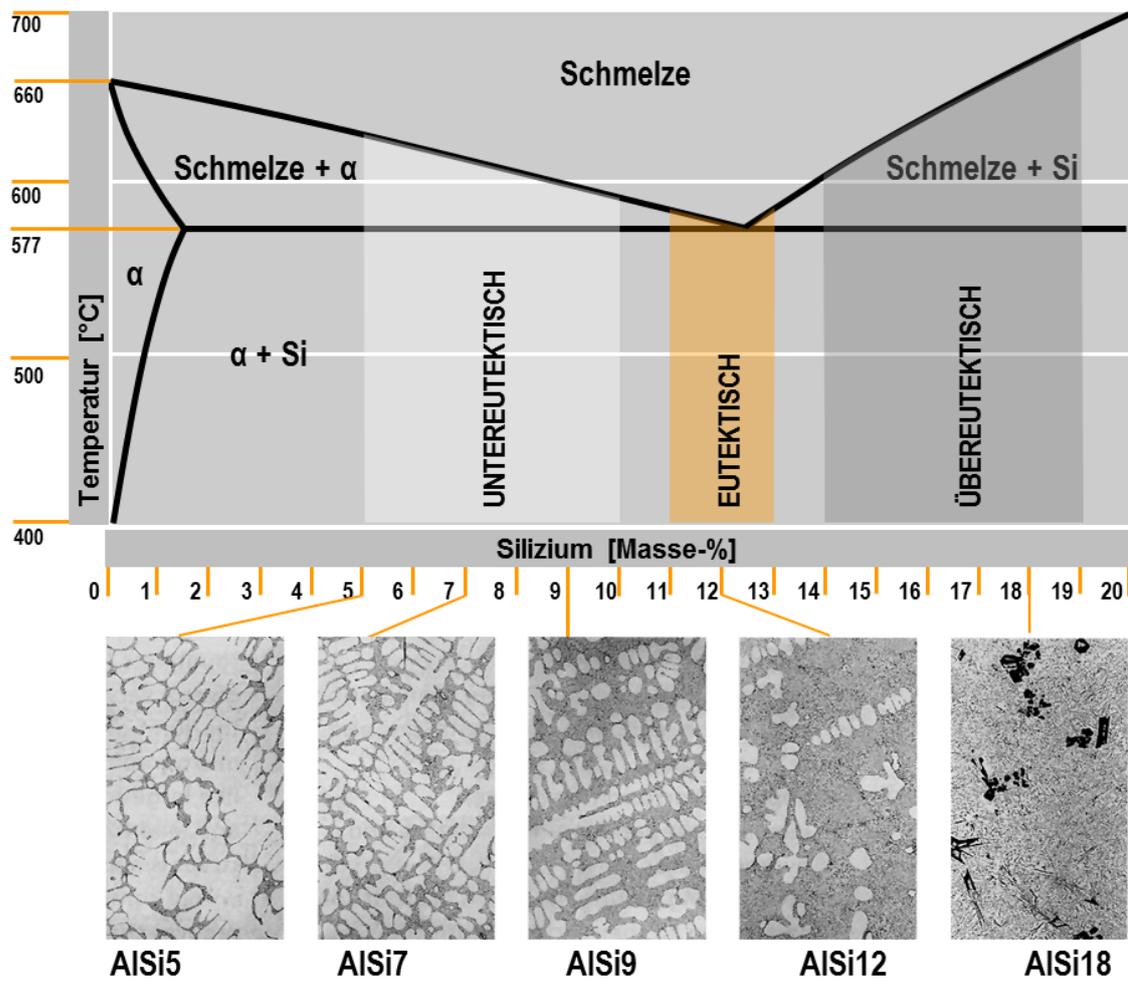


Abbildung 2-8: Teilbereich des Al-Si-Phasendiagramms mit Gefügeschaubildern bei unterschiedlichen Si-Gehalten, nach [9].

2.4 Gussfehler

Vorweg muss festgehalten werden, dass die Herstellung eines vollständig lunker- oder gasporenfreien Gussteils im Druckguss nicht realisiert werden kann. Abbildung 2-9 bietet einen Auszug der möglichen Gießfehler im Druckgießprozess, eingeteilt nach deren Ursache.

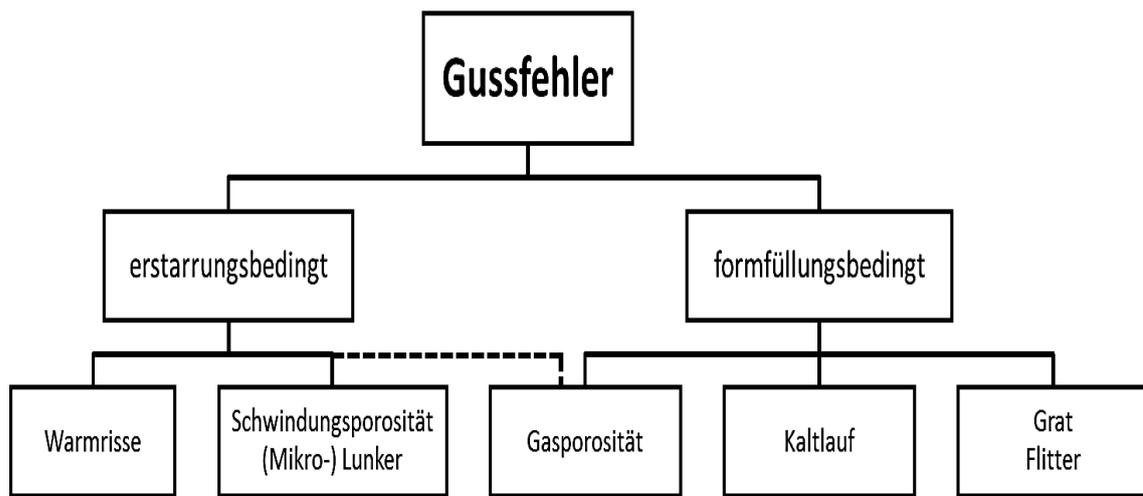


Abbildung 2-9: Einteilung möglicher Gießfehler im Druckgießprozess.

2.4.1 Formfüllungsbedingte Fehler

2.4.1.1 Gasporosität

Die Entstehung von Gasporosität kann entweder auf thermodynamische oder auf strömungsmechanische Ursachen zurückgeführt werden.

Thermodynamisch bedingt sinkt die Löslichkeit für elementar gelöste Gase in flüssigen Metallen mit fallender Schmelztemperatur und fallendem Partialdruck. Beim Erstarrungsvorgang wird diese Löslichkeitsgrenze überschritten, die Gase beginnen sich bei einem Feststoffanteil $f_s \approx 70\%$ aus der Schmelze auszuschcheiden, es kommt zur Bildung von Gasporosität, die sich in Bereichen der Resterstarrung anreichern. Typisches Beispiel in Aluminiumlegierungen sind Wasserstoffporen. Wenn diese bei ihrer Entstehung von Schmelze umschlossen sind, weisen sie eine annähernd kreisrunde Form und einen glatten Porenrand auf. Bei Legierungen mit einem breiten Erstarrungsintervall findet die Ausscheidung der Gase hauptsächlich zwischen den Dendritenarmen statt, wodurch die sonst typischerweise kreisrunde Form entarten kann.

Abhilfe kann durch eine Schmelzeentgasung mittels Inertgas (Argon) geschaffen werden. Durch den Nachdruck können die eingeschlossenen Gase zum Teil auf unbedenkliche Größe komprimiert werden.

Eine weitere Quelle für mögliche Gasporosität stellt die Gasabgabe durch verdampfende Trennmittel nach dem Sprühen der Form dar. Ursachen dafür können übermäßiger Auftrag von Trennmittel bzw. unzureichendes Ausblasen der Form nach erfolgtem Sprühen sein, sodass Wasser- und Trennmittelrückstände im Formhohlraum verbleiben. Diese Rückstände verdampfen beim Kontakt mit der Schmelze schlagartig, wobei sich theoretisch aus 1 g Wasser bis zu 1,25 Liter Dampf bilden kann. Durch Dissoziation der Wasserdampfmoleküle kann der atomar gelöste Wasserstoff in der übersättigten Aluminiumschmelze zu H₂-Molekülen rekombinieren. Das entstandene Gas diffundiert in die Schmelze und wird bei der Erstarrung in Form von Blasen eingeschlossen.

Hauptursache für strömungsbedingte Gasporosität ist mitgerissene Umgebungsluft, verursacht durch eine turbulente Metallströmung in der Gießkammer, im Lauf und im Anschnitt bzw. eine unzureichende Entlüftung der Kavität während der Formfüllphase. Aufgrund der Formfüllgeschwindigkeiten (> 30 m/s) kann die Luft nur teilweise über die Entlüftungskanäle entfernt werden. Wie bereits Abbildung 2-3 zeigt, trägt die turbulenzfreie Bewegung der Schmelze in der Gießkammer bzw. die richtige Wahl der Gießkolbengeschwindigkeit den Hauptanteil, um das Einschließen einer großen Luftmenge in der Schmelze zu vermeiden. In Abbildung 2-10 ist ein Ausschnitt einer lichtmikroskopischen Aufnahme (LM) eines Druckgussteils zu sehen, der das typische Erscheinungsbild von massiver Gasporosität widerspiegelt.

Eine weitere Maßnahme, Gasporosität zu minimieren, ist vakuumunterstütztes Druckgießen. Dabei wird vor der Schussauslösung mittels einer Vakuumeinrichtung ein Unterdruck von ca. 400 mbar erzeugt, wodurch sich in der Kavität ein geringerer Luftdruck als der Atmosphärendruck einstellt und die Formentlüftung begünstigt. Auch stellt die Sauberkeit der Form, sprich keine verstopften Entlüftungskanäle oder Überläufe, einen wichtigen Faktor zur Vermeidung von Gasporosität dar [15,16,17].

Ziel ist es somit möglichst wenig Gase im Gefüge einzuschließen bzw. diese auf unbedenkliche Größe zu komprimieren. Besonders bei Gussteilen, die einer nachfolgenden Wärmebehandlung unterzogen werden, ist ein sehr niedriger Gasgehalt unbedingt erforderlich, um die Gefahr der Blisterbildung zu vermeiden.

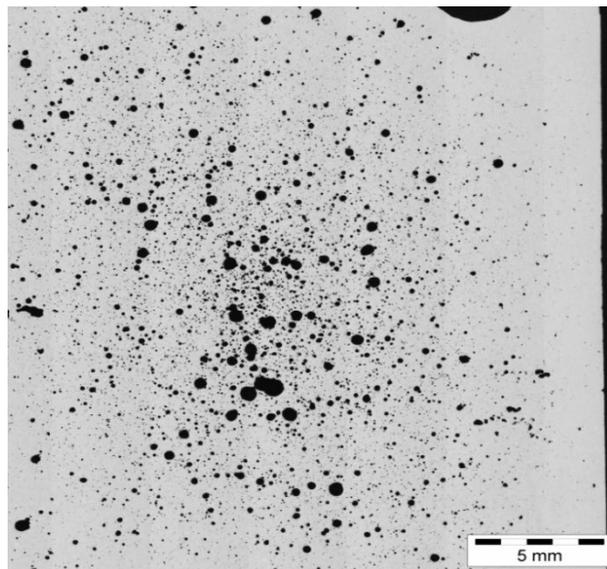


Abbildung 2-10: LM, Ausschnitt eines Druckgussteils mit massiver Gasporosität [18].

2.4.1.2 Kaltfließstelle

Bei langen Fließwegen, unzureichender Formtemperatur oder zu niedriger Anschnittsgeschwindigkeit kann es zu vorzeitigen Erstarrungen an der Schmelzefront kommen. Treffen erkaltete Bereiche aufeinander, können sich die Oberflächen nicht mehr miteinander verbinden und es kommt zu schlechten Materialverbindungen, eventuell eingeschlossenen Oxidhäuten, nicht ausgelaufenen Bereichen oder Überlappungen. Dieser Fehler ist meist schon mit freiem Auge an der Oberfläche sichtbar. Eine lichtmikroskopische Aufnahme einer Kaltfließstelle ist in Abbildung 2-11 dargestellt [19].

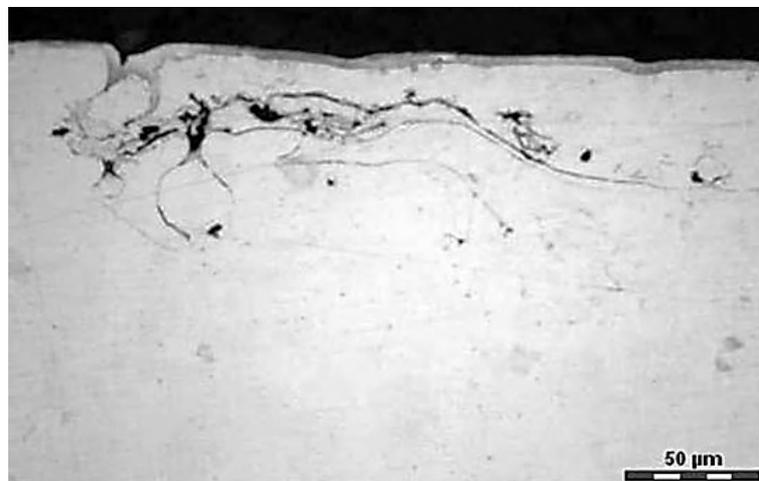


Abbildung 2-11: LM, Kaltfließstelle in einem Druckgussteil [18].

2.4.1.3 Spritzperlen, Flitter

Durch die beim Druckguss vorherrschenden hohen Strömungsgeschwindigkeiten des Metalls bei der Formfüllung, kommt es zum Aufbrechen der Schmelzefront, sodass durch die Spritzwirkung vorzeitig erstarrte Metalltropfen entstehen, sogenannte Spritzperlen oder Cold Drops. Aufgrund der schnellen Abkühlung jener bildet sich ein sehr feines Gefüge aus. Geschützt durch eine Oxidhaut schmelzen die Tropfen, trotz der vom nachfließenden Metall eingebrachten Wärme, nicht mehr auf und werden dadurch angelassen. Dies resultiert in gehärteten Partikeln, die eingeschlossen für eine nachfolgende Bearbeitbarkeit hinderlich sein können.

Ähnliche Gießfehler verursachen Flitter. Dies sind in der Formtrennung entstandene dünne, schnell erstarrte Metallplättchen, die durch ein unzulängliches Ausblasen der Form in der Kavität verbleiben und beim nachfolgenden Schuss miteingegossen werden. Somit widerfährt auch diesem eine Wärmebehandlung. Nicht nur der daraus resultierende Härteunterschied im Gefüge führt zu einer Werkstoffschädigung, sondern auch aufgrund der Kontur des Fehlers, die eine offensichtliche Kerbwirkung impliziert, kommt es zu einer zusätzlichen Beeinträchtigung der mechanischen Eigenschaften [18].

Abbildung 2-12 zeigt die zwei Gießfehler, welche durch ihr feineres Gefüge deutlich vom umgebenen Material unterscheidbar sind. Links der eingegossene Flitter und rechts die eingegossene Spritzkugel, beide aufgenommen unter dem Lichtmikroskop.

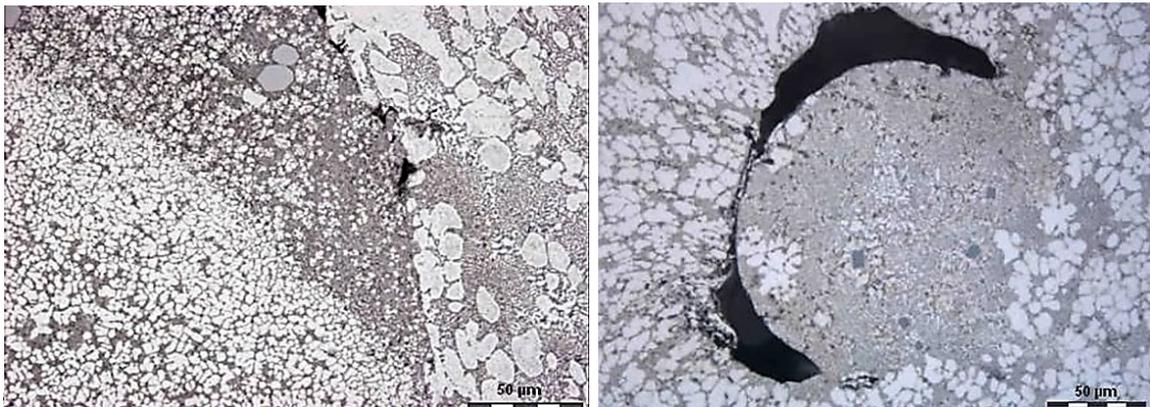


Abbildung 2-12: LM, eingegossener Flitter (links) und eingegossene Spritzkugel (rechts) [18].

2.4.2 Erstarrungsbedingte Fehler

2.4.2.1 Schwindungsporosität, (Mikro-)Lunker

Druckgusslegierungen zeigen bei der Erstarrung immer eine Volumsabnahme (Schwindung), da diese im flüssigen und im festen Aggregatzustand unterschiedliche Dichten besitzen. Beim Phasenübergang kommt es dadurch zu einer sprunghaften Abnahme des spezifischen Volumens, der Erstarrungsschrumpfung. In Abbildung 2-13 ist die Volumenkontraktion bzw. die Erstarrungsschrumpfung α im 2-Phasen Gebiet, d. h. zwischen der Liquidustemperatur T_L und der Solidustemperatur T_S , von Reinaluminium zu sehen.

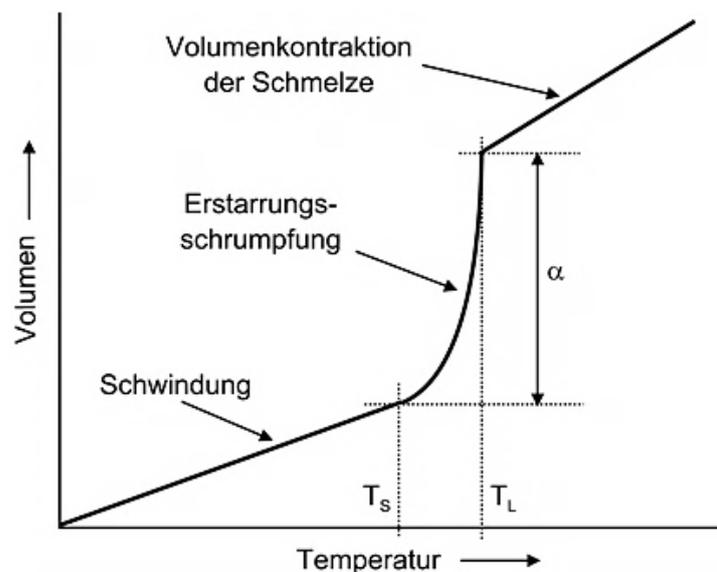


Abbildung 2-13: Temperaturabhängigkeit des spezifischen Volumens von Reinaluminium [6].

Für das Gussstück, bei dem sich zuerst die Randschale bildet und der Anguss früh erstarrt, bedeutet das, dass keine Schmelze mehr in das Innere nachgeliefert werden kann und ein Hohlraum aufgrund des Volumendefizites entsteht, da die Erstarrung an überhitzten Stellen nicht gelenkt erfolgt. Die Volumenschwindung bei Abkühlung und Erstarrung kann an diesen Stellen nicht nachgespeist werden und Gase können aus der Schmelze in die entstandene Mikrolunker diffundieren und diese zudem aufweiten.

Das Lunkerverhalten einer Legierung hängt von dem Erstarrungsintervall, der Änderung des Erstarrungsablaufs, dem Grad der konstitutionellen Unterkühlung (siehe Abbildung 2-5) und den Legierungselementen ab. Mit steigenden Gehalten von Kupfer, Zink und besonders Silizium, welches den stärksten positiven Einfluss hat, fällt die Lunkerneigung

im Vergleich zum Reinstoff. Je größer das Temperaturintervall der Erstarrung ist, desto größer ist das Volumen an Mikroporosität, d. h. Legierungen im naheutektischen Bereich weisen generell eine geringe Lunkerneigung auf. Ein Beispiel einer mikrolunkerarmen Legierung ist die EN AC-47000 [Al Si12(Cu)], auch Al231 genannt [4,19,20].

Nach [17] lässt sich der Volumenanteil a_L von Lunkern, die den größeren Anteil der Gesamtporosität darstellen, mit Gleichung (1), die sich aus dem Verhältnis der Dichten der Druckgusslegierung im flüssigen Zustand ρ_L und festen Zustand ρ_S ergibt, berechnen.

$$a_L = \left[1 - \frac{\rho_L}{\rho_S} \right] * 100\% \quad (1)$$

Das nach dieser Gleichung (1) ermittelte Volumen a_L kann, in Abhängigkeit von der Zusammensetzung der Druckgusslegierung, Werte zwischen 3 – 6 % einnehmen [17].

Generell kann gesagt werden, dass die Lunkerneigung umso größer ist, je dickwandiger das Gussteil konstruiert ist. Eine druckgussgerechte Gestaltung, d. h. möglichst dünnwandig, sofern sich dies dem Anforderungsprofil entsprechend noch realisieren lässt, ist unerlässlich um fehlerarme Gussstücke zu erzeugen.

In Abbildung 2-14 ist eine Lichtmikroskopaufnahme von Mikrolunkern im Gefüge eines Druckgussteils zu sehen. Diese unterscheiden sich durch ihre unregelmäßig gestaltete Form, verglichen mit Gasporen.

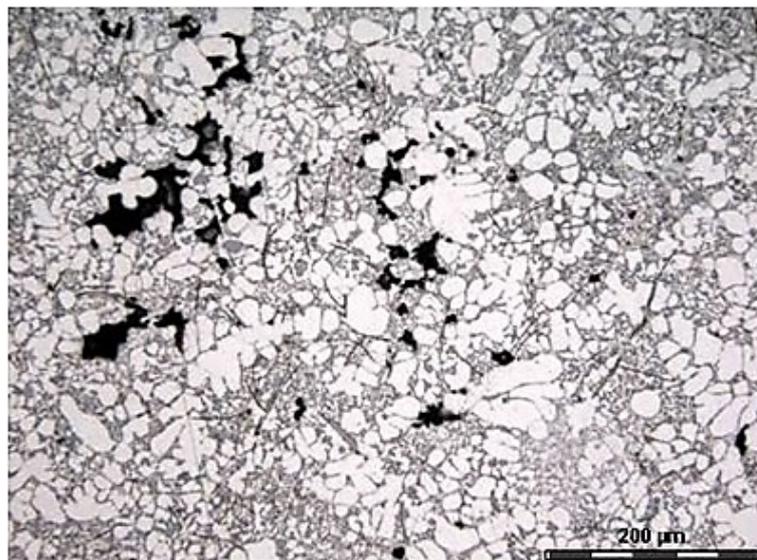


Abbildung 2-14: LM, Mikrolunker in einem Druckgussteil [18].

2.4.2.2 Warmriss

Warmrisse sind interkristalline Werkstofftrennungen, die Spannungen als Voraussetzung haben. Dieser Gussfehler entsteht kurz vor der vollständigen Erstarrung, also im Temperaturbereich nahe dem Solidus, wenn zwischen den Körnern noch geringe Mengen von Restschmelze vorhanden sind und auf diese Zugspannungen, durch Schwindungshemmung, wirken. Dabei spielt nicht nur ein ausgeprägtes Erstarrungsintervall, sondern auch die geometrische Gestaltung des Bauteils und die Auslegung der Druckgussform eine entscheidende Rolle. In Abbildung 2-15 ist eine schematische Modellvorstellung über die Entstehung von Warmrissen zu sehen. Charakteristisch für einen Warmriss sind die dendritenförmigen Strukturen in den geöffneten Rissflanken bzw. Bruchflächen [6].

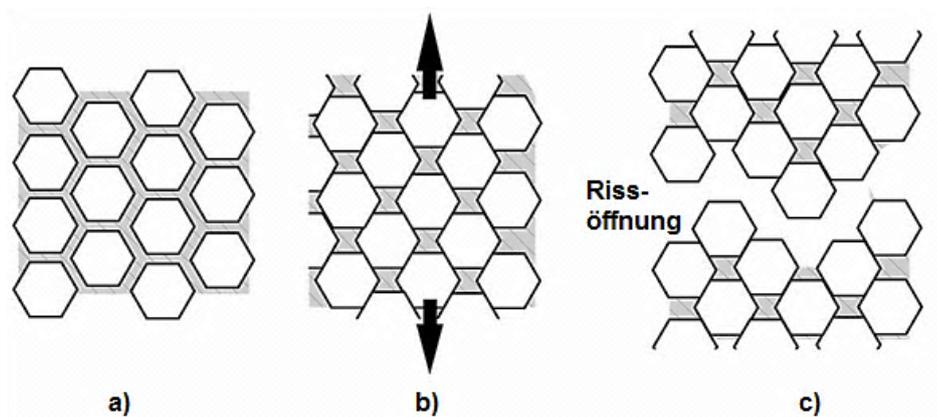


Abbildung 2-15: Schema über die Entstehung von Warmrissen a) Ausgangszustand: Körner umgeben von Eutektikum, b) durch Streckung des Gefüges bilden sich abgeschlossene Restschmelzebereiche, c) durch weitere Zugspannungen öffnet sich ein Riss [12].

Generell kann bei der Warmrissbildung von zwei Theorien ausgegangen werden. Die Erste basiert auf dem Spannungs- und Dehnungsverhalten einer Legierung, in Bezug auf ihre thermo-mechanischen Eigenschaften. Die zweite Theorie hingegen bezieht sich auf metallurgische Faktoren einer Legierung und die Bildung eines interdendritischen Flüssig-Films verbunden mit einem mangelnden Speisungsvermögen. Aus Studien von Pellini [21] geht jedoch hervor, dass die Warmrissbildung als ein komplexes Phänomen betrachtet werden kann, welches eine Kombination von metallurgischen und thermo-mechanischen Wechselwirkungen darstellt [11,22].

Für den Vorgang der Warmrissbildung sind mehrere Stadien zu unterscheiden [8]:

- Zu jenem Zeitpunkt während der Erstarrung, bei dem sich ein Schmelzefilm zwischen den lokal getrennten, sich relativ voneinander wegbewegenden, Dendriten befindet, kann durch ein ständiges Nachfließen der Restschmelze die Ausbildung eines Risses verhindert bzw. ein dennoch entstehender Riss ausgeheilt werden. Hierbei spielt das Speisungsvermögen des Gusswerkstoffes neben der Morphologie der Erstarrungsfront eine entscheidende Rolle.
- Der einmal entstandene Primärriss kann durch Kerbwirkung und Spannungskonzentration weiterwachsen, sogar in das Gebiet unterhalb der Solidustemperatur hinein.
- Ein ausgeheilte Riss kann im Nachhinein erneut reißen (Sekundärriss), weil die nachgeflossene Restschmelze auf Grund von Seigerungen und möglichen Einschlüssen schlechte Festigkeitseigenschaften aufweisen kann.

Als besonders warmrissbeständig erweisen sich daher Legierungen, die bei einem geringen Erstarrungsintervall am Ende der Erstarrung noch über genügend Resteutektikum verfügen. Bei Kenntnis des Erstarrungstyps einer Legierung kann meist direkt das Speisungsvermögen und die damit verbundene Anfälligkeit auf Warmrisse prognostiziert werden (siehe Kap 2.2). Durch eine Umgestaltung des Bauteils, bei dem Materialverdickungen vermieden werden, oder durch gezielte, örtliche Kühlung der Druckgussform kann dieser Fehler größtenteils kompensiert werden [6,8].

2.5 Squeezen – Lokales Nachverdichten

In Bereichen hoher Strömungsgeschwindigkeiten erhöht sich die Formtemperatur überproportional im Vergleich zu anderen Bereichen der Form, woraus sich ungleichmäßige Erstarrungszeiten im Gussstück ergeben. Dies hat zur Folge, dass es in diesem Bereich des Gussstücks vermehrt zu Fehlstellen, wie (Mikro-) Lunkern oder Gasporosität, kommt. Auch dickwandige Bereiche in Gussteilen neigen aufgrund ihrer verzögerten Erstarrung zu dieser Art von Fehlern, da bloßes Nachverdichten unmittelbar nach der Formfüllung oft nicht ausreicht, um die Bildung von Porosität effizient zu hemmen. Werden nun höhere Anforderungen an die Dichtheit dieser Bereiche gestellt, als durch den Standardprozess erfüllt werden, kann in diesem Fall ein mechanisches, lokales Nachverdichten, das sogenannte *Squeezing*, Abhilfe schaffen. Durch dieses

zusätzliche Nachverdichten, welches unabhängig vom allgemeinen Nachdruck erfolgt, ergeben sich neben der Porositätsminderung auch neue Möglichkeiten bei der Auslegung und Gestaltung von Druckgussteilen. Untersuchungen von Kim [23] zeigten, dass bei Verwendung von Squeeze-Pins in Druckgussformen eine Kompensation erstarrungsbedingter Porosität bewirkt werden kann [17,24].

Beim direkten Verfahren, bei dem der Squeeze-Pin direkt in den zu verdichtenden Bereich einfährt, sollten der Pindurchmesser und der Einfahrweg so ausgelegt sein, dass die Volumenkontraktion und die dadurch entstehende Porosität durch die verdrängte Menge an Schmelze kompensiert wird. Gleiches gilt beim indirekten Squeezeln, welches sich eines Squeeze-Reservoirs bedient, in das der Pin einfährt. Dieses sollte ausreichend groß dimensioniert sein, damit die Menge an verdrängtem Material der Erstarrungsschwindung entgegenwirken kann. Das Verdrängungsvolumen sollte nicht zu gering, aber auch nicht zu groß sein, da sonst das Verhältnis Ausbringung zu dosierter Schmelze zu klein wird und besonders aus großtechnischer Sicht zu einem unwirtschaftlichen Ergebnis führt. Mit Gleichung (2) lässt sich das zu verdrängende Volumen berechnen. In dieser Gleichung repräsentieren V das Verdrängungsvolumen, V_a die Menge an Schmelze im Formhohlraum, V_b die Menge an Schmelze im Lauf, ρ die Dichte des Gussstücks ohne Squeezeln, ρ_o die Dichte der Schmelze und K ein Squeeze-Faktor, mit Werten zwischen 0,3 und 1 [24].

$$V = \frac{\rho_o - \rho}{\rho_o} V_a + \frac{\rho_o - \rho}{\rho_o} V_b \cdot K \quad (2)$$

Voraussetzung für ein erfolgreiches Squeezeln ist, dass der Anguss bzw. der Anschnitt bereits erstarrt ist, da der Squeeze-Druck, wie in Abbildung 2-16 zu sehen ist, abhängig vom gewählten Pindurchmesser sehr hohe Werte annehmen kann. Durch diese Squeeze-Drücke, die um ein Vielfaches höher sein können als der allgemeine Nachdruck, werden der Gießkolben und somit auch die Schmelze, bei noch offenem Anschnitt, in die Gießkammer zurückgedrängt. Ein nutzbringendes Squeezeln ist folglich nicht möglich. Weiters kann bei einem lokalen Squeeze-Druck, der dem effektiven lokalen Nachdruck des Gießkolbens entspricht, ebenfalls kein effizientes Squeezeln stattfinden [24].

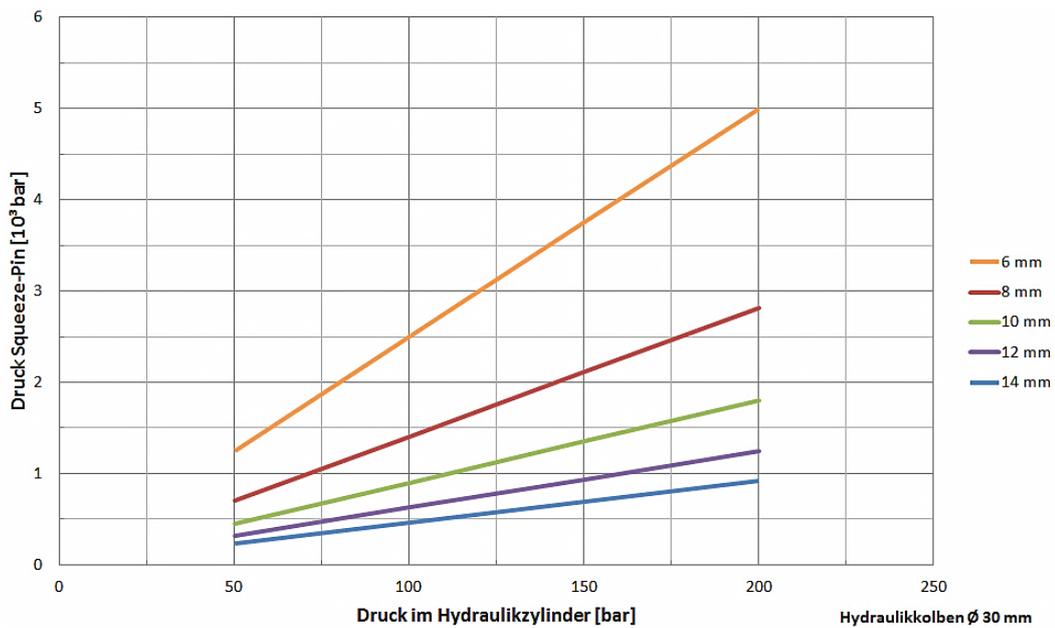


Abbildung 2-16: Squeeze-Druck-Diagramm für verschiedene Squeeze-Pindurchmesser.

Neben der Wahl des Squeeze-Drucks stellt die Ermittlung des Einfahrzeitpunkts nach vollständiger Formfüllung, sprich die Zeitverzögerung (*Time-Lag*) bis zum Einfahren des Squeeze-Pins, eine wichtige Größe im Prozess dar. In Abbildung 2-17 ist der schematische Verlauf der Gieß- bzw. Squeeze-Kurve dargestellt, mit dem *Time-Lag* und der Höhe des Squeeze-Drucks.

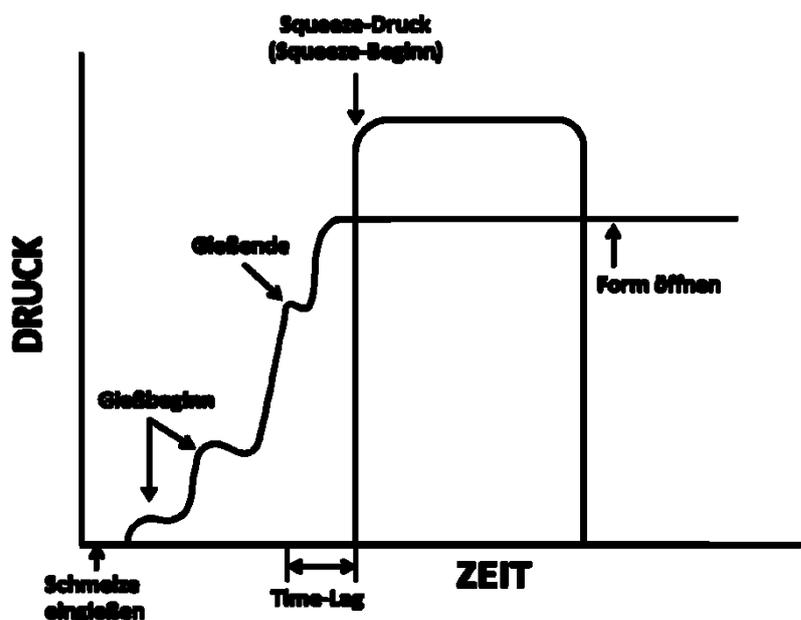


Abbildung 2-17: Schematische Darstellung des Druck-Zeit-Verlaufs der Gießkurve [23].

Ist der sogenannte Time-Lag bis zum Squeezen zu lang, können sich in einer bereits erstarrten Schicht Porositäten bilden, die anschließend nur mehr durch überproportional hohe Squeeze-Drücke eliminiert werden können. In Untersuchungen von Suzuki [24] zeigte sich, dass mit steigender Einfahrverzögerung der Einfluss des Squeezens abnimmt bzw. die Gussstückqualität durch Oberflächenfehler und lokalbedingte Seigerungen vermindert wird. Versuche von Kim [23] zeigten, dass bei zu niedrigen Drücken bei zu langem Time-Lag mit einem höheren Umformwiderstand durch die bereits erstarrte Schicht, eine sogenannte *Speckschicht*, zu rechnen ist und der Einfahrweg abnimmt bzw. die Bewegung des Squeeze-Pins gänzlich gehemmt werden kann. Bei hohen Drücken und zu kurzem Time-Lag fährt der Squeeze-Pin während der Erstarrung bereits zum Endpunkt vor, der Squeeze-Druck verteilt sich über die gesamte Kavität und ein effizientes Squeezen im ausgewählten Bereich wird nicht stattfinden. Ein optimales Squeeze-Ergebnis kann also erreicht werden, wenn der Squeeze-Pin während der Erstarrung nicht bis zum Endpunkt einfährt. Den Zusammenhang zwischen spezifischer Dichte und aufgebrauchten Squeeze-Drücken bei unterschiedlichen Einfahrzeitpunkten liefert das Diagramm in Abbildung 2-18, wo die beste Verdichtung bei Drücken von ca. 2000 bar und einem Time-Lag von einer Sekunde erreicht wird [23,24,25].

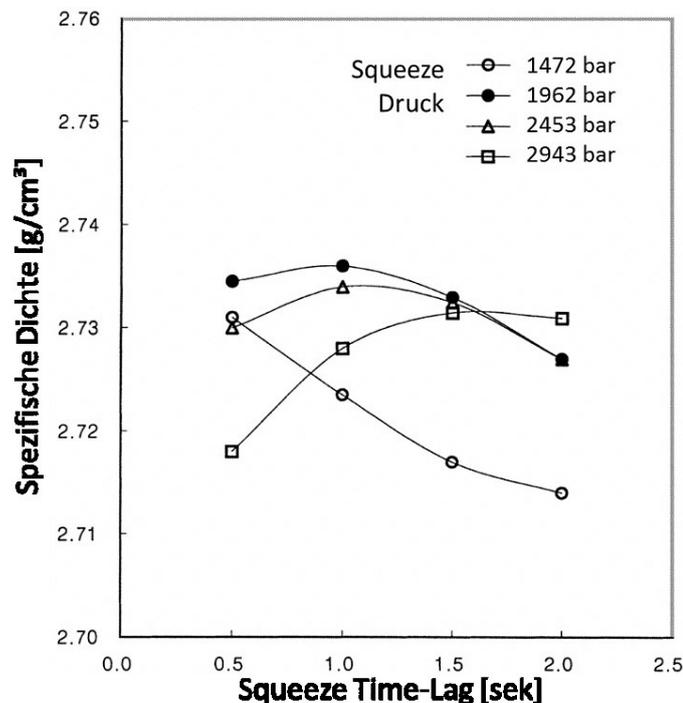


Abbildung 2-18: Auswirkungen des Squeeze-Drucks und der Verzögerung des Einfahrzeitpunkts auf die spezifische Dichte des Gussstücks [23].

Neben dem Einfahrzeitpunkt stellt der Einfahrweg einen weiteren Parameter beim Squeezzen dar. Zur Bestimmung bzw. zur Kontrolle des optimalen Verdichtungshubs kommt ein Wegmesssensor zum Einsatz, der den Einfahrweg aufnimmt. Diese sind von Vorteil, wenn speziell mehrere Squeeze-Pins zum Einsatz kommen. Die Bewegung des Pins wird in Echtzeit geregelt, d. h. die tatsächliche Position wird, in Abhängigkeit von der Gießform und den Gießbedingungen, bestimmt, mit den programmierten Werten verglichen und gegebenenfalls automatisch, über den Druck und die Durchflussmenge im Squeeze-Zylinder, korrigiert.

In Bezug auf das Nachspeisungsvermögen durch Squeeze-Pins lässt sich folgende Verbindung herleiten. Im Squeeze-Bereich liegt eine bestimmte Wechselwirkung zwischen lokalem Speisungsvermögen und dem halbflüssigen Material vor. Mit fortschreitender Erstarrung können folgende Zusammenhänge im Squeeze-Bereich auftreten:

- Flüssigspeisung (Kozeny-Carman Beziehung),
- Massenspeisung (vgl. Thixoforming) und
- Überlastung des granularen Materials (mögliche Rissentstehung).

Mithilfe der Kozeny-Carman Beziehung in Gleichung (3) kann abgeschätzt werden, wie groß der Druckverlust eines Fluids beim Durchströmen eines granularen Materials ist.

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{180 \mu u (1-\varepsilon)^2}{\Phi_s^2 D_p^2 \varepsilon^3} \quad (3)$$

In dieser Gleichung (3) ist Δp der Druckverlust über dem granularen Material mit der Höhe L , μ die Viskosität und u die Geschwindigkeit des Fluides (Anströmgeschwindigkeit); Φ ist die Rundheit und D der effektive Durchmesser des kugelförmigen Partikels bzw. ε die Porosität (Durchlässigkeit) des granularen Materials.

Für die Nachverdichtung heißt das, welcher Druck ist nötig, um die Schmelze durch die bereits gebildeten Dendriten zu pressen und eine Speisung zu bewirken. Die Massenspeisung kann mit dem Thixoforming-Prozess verglichen werden, da hier von einem Festphasenanteil von ca. 50 - 60 % ausgegangen werden kann und ein bereits körniges Gefüge vorliegt, das von Restschmelze umgeben ist. Es steigt somit auch der notwendige Druck um ein effizientes Nachverdichten zu gewährleisten. Bei weiter

fortgeschrittener Erstarrung kann es im Zuge der lokalen Nachverdichtung zu Überlastung des granularen Materials bzw. des bereits gebildeten Netzwerks kommen, sodass durch auftretende Scherspannungen Risse (Warmrisse) induziert werden können [1,26,27].

Zusammengefasst werden nachfolgende Bedingungen an Prozessablauf des Squeezens gestellt:

- Der Verdichtungshub und der Durchmesser des Squeeze-Pins sowie des Reservoirs müssen so dimensioniert sein, dass ausreichend Restschmelze vorhanden ist um der Erstarrungsschwindung entgegenzuwirken.
- Der Einfahrzeitpunkt muss so gewählt werden, dass der Squeeze-Vorgang frühestens mit geschlossenem Anschnitt gestartet wird bzw. muss so gesetzt sein, dass sich keine Randschale vor dem Stempel gebildet hat, welche nicht mehr durchdrungen werden kann.
- Der Druck des Squeeze-Pins muss so bemessen sein, dass ausreichend Material durch eventuell bereits teilerstarnte Bereiche gefördert werden kann bzw. der Druck darf nicht zu hoch sein, um nicht bereits erstarrte Bereiche im Einflussbereich des Squeezers zu beschädigen.

Der Squeeze-Vorgang ist somit als eine Funktion aus den Parametern Weg, Zeit und Druck anzusehen und ist vom Prinzip her ähnlich der Funktion bei der Formfüllung.

3 Experimentelle Methoden

3.1 Computertomografie

3.1.1 Allgemein

Der Einsatz der Computertomografie (CT) in der Technik zur Material- und Bauteilprüfung erfolgt seit Mitte der 90er-Jahre. Die CT zählt zu den Verfahren der Radioskopie, dem Durchstrahlungsverfahren mit Röntgen- und Gammastrahlen, bei dem es möglich ist durch Verfolgung des Durchstrahlungsweges eines Objektes aus unterschiedlichen Aufnahmewinkeln eine Beurteilung über einzelne Details hinsichtlich Tiefelage und Ausdehnung zu erlangen. Bei komplexeren Bauteilen muss jedoch eine Vielzahl an Aufnahmepositionen gewählt werden, um bei der anschließenden Rekonstruktion des Modells Überlagerungen von Bilddetails, wie z. B. hintereinanderliegende Objekte, zu vermeiden. Dadurch entsteht eine überlagerungsfreie, radioskopische Aufnahme des untersuchten Volumens, das die zerstörungsfreie Untersuchung innerer Strukturen, wie Unterschiede im Gefügebau, Einschlüsse, Lunker oder Materialtrennungen, ermöglicht [28,29].

Bei der Aufnahme kommen Detektoren zum Einsatz, welche das Signal entweder direkt sichtbar machen und somit meist einen sofortigen Befund ermöglichen, oder es für eine elektronische Auswertung (elektronische Ladungen) umwandeln. Unter Ausnutzung des gesamten konusförmigen Röntgenstrahls wird das Objekt auf einen Flächendetektor projiziert, wodurch kürzere Messzeiten realisiert werden können. Dabei rotiert das Messobjekt einmal in kleinen Schritten ($< 1^\circ$) um seine Drehachse, wodurch eine Fülle an zweidimensionalen (2D) Projektionen, aus unterschiedlichen Winkelpositionen, aufgenommen werden. Um Daten für ein dreidimensionales (3D) Modell zu erhalten, bewegt sich das Objekt bei jeder Messung zusätzlich in Achsenrichtung, bis eine genügende Anzahl an Schnitten aufgenommen wurde. Durch diese dynamische Prüfung kann somit die optimale Einstrahlrichtung ermittelt werden, um bestimmte Ungenzen des Objekts zu suchen [28].

Das 3D-Modell entsteht durch die Berechnung mithilfe von mathematischen Algorithmen auf Basis der 2D-Projektionen und wird als Rekonstruktionsmatrix (Volumenelement) bezeichnet, die aus Voxel (Volumenpixel), dem kleinsten Element, zusammengesetzt ist. Während der Rekonstruktion können Störgrößen, wie Abweichung bei der Aufnahmeposition rechnerisch oder Artefakte, zu denen das Rauschen zählt, korrigiert

bzw. reduziert werden. In Abbildung 3-1 ist ein schematischer Ablauf der Aufnahme eines Prüfobjekts, der anschließenden Rekonstruktion zu einem 3D-Modell (aufgebaut aus Voxel) und der finalen Ansicht mit einer bereits durchgeführten Fehleranalyse, dargestellt [28].

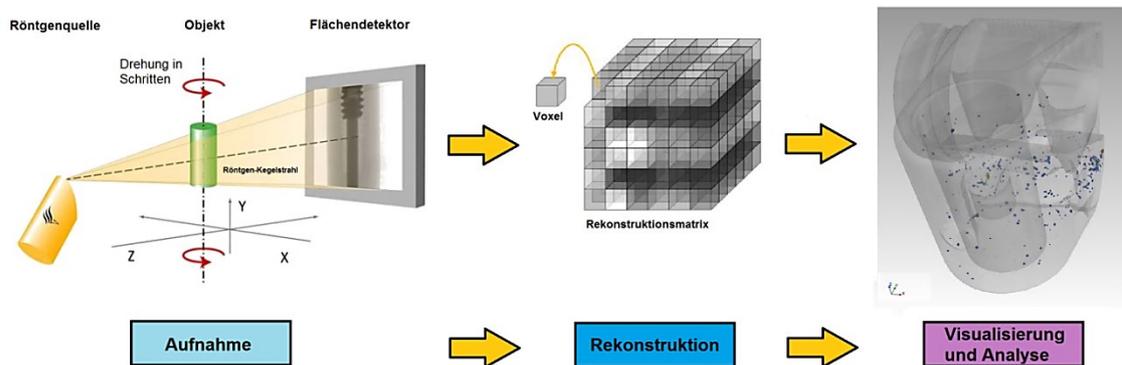


Abbildung 3-1: Schematische Übersicht einer 3D-CT-Aufnahme (links), der Rekonstruktion des Volumenelements (Mitte) und der Visualisierung mit dem Ergebnis einer Fehleranalyse (rechts) [nach 30].

Die Darstellung eines 3D-Modells ist für das räumliche Empfinden des Betrachters zwar von Vorteil, bei der Präsentation auf einem 2D-Schirm jedoch können Details überlagert dargestellt werden. Mithilfe von digitalen Filtern können die Daten so bearbeitet werden, dass bestimmte Bereiche hervorgehoben werden, um diese hinsichtlich ihrer Eigenschaften zu analysieren. Auf diese Weise lassen sich Einschlüsse von Materialien mit unterschiedlicher Röntgenabsorption, wie z. B. Poren oder Seigerungen, eruieren [28].

In Abbildung 3-2 ist der Prüfraum der CT-Anlage mit dem Detektor (Mitte), einem eingespannten Objekt auf dem Drehtisch und der Röntgenröhre (rechts) am Österreichischen Gießerei-Institut (ÖGI) zu sehen. Hierbei handelt es sich um eine hochauflösende Anlage der Marke phoenix|x-ray v|tomec|x c von GE Measurement & Control. Dieses System verwendet eine 240 kV Mikrofocus-Röntgenröhre mit einer Voxelauflösung von $> 4 \mu\text{m}$ Kantenlänge und einem Flächendetektor mit einer Auflösung von 1000×1000 Pixel, bei einem Fototransistorabstand von $200 \mu\text{m}$. Die Auswertung und Rekonstruktion der erhaltenen Daten des gescannten Objekts erfolgt mit der Software Volume Graphics 3D-Studio Max 2.2.

Von den in dieser Arbeit untersuchten Teilen wurden *Fast-Scans* erstellt. Dabei handelt es sich um eine schnelle CT-Aufnahme der Projektionsdaten durch eine kontinuierliche Probenrotation. Aufgrund der relativ kurzen Scan-Dauer von ca. 30 Minuten ist die Auflösung (360 μm Voxel-Kantenlänge) der Aufnahme dementsprechend gering.



Abbildung 3-2: Übersicht des Prüfraums der CT-Anlage mit Detektor (Bild Mitte), eingespanntem Objekt am Drehtisch und Röntgenröhre (rechts) am ÖGI.

3.2 Lichtmikroskopie

Für lichtmikroskopische Aufnahmen (LM) wurden Schiffe mit handelsüblichen Schleifmitteln hergestellt. Die Proben wurden auf einem Lichtmikroskop der Marke Olympus BX60M betrachtet und mit der Bildanalysesoftware *analySIS auto 5.1*, Olympus Soft Imaging Solutions, ausgewertet. Beide Gerätschaften sind in Abbildung 3-3 dargestellt. Neben der allgemeinen Untersuchung des Schliiffgefüges wurden, sofern nicht anders angegeben, Porositätsauswertungen nach VDG-Merkblatt P201 vorgenommen.

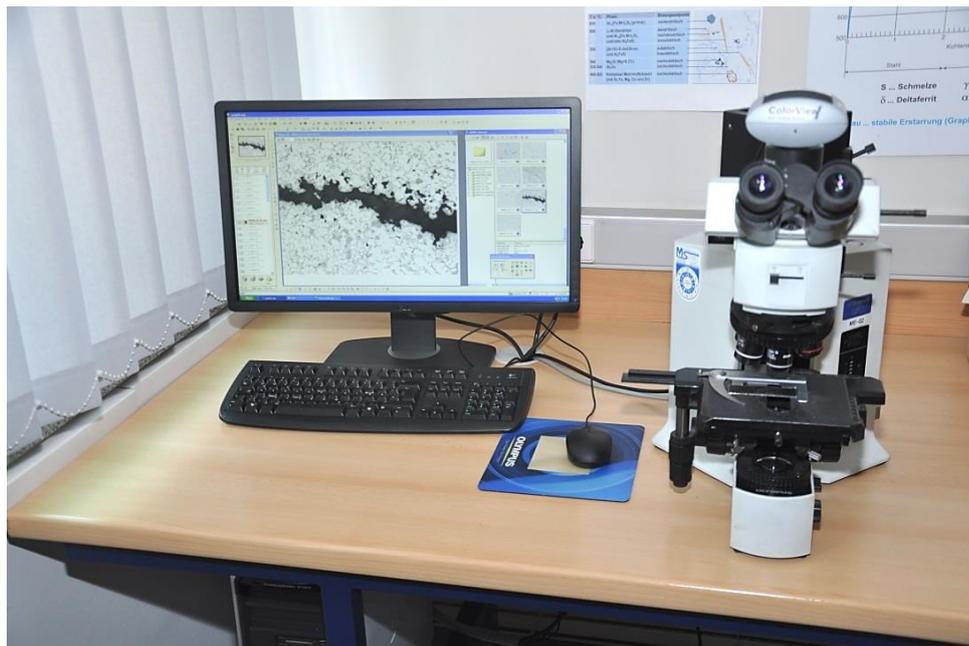


Abbildung 3-3: Lichtmikroskop mit PC-Einheit am ÖGI.

3.3 Rasterelektronenmikroskopie

Bei dem für die Untersuchungen der Schiffe benutzten Rasterelektronenmikroskop (REM) handelt es sich um ein FEI Quanta 200 Mk2 3D mit Dual-Strahl (Ionen-Eisen- und Elektronenstrahl), Spannung 30 kV bei einem Hochvakuum von $\approx 1,5 \cdot 10^{-2}$ Pa. Die Aufnahmen wurden mit dem Back-Scattered-Detektor (BSD) und dem Everhart-Thornley-Detektor (ETD) durchgeführt.

Der BSD-Modus dient zur Detektion unterschiedlicher Dichten im Material. Das heißt helle Bereiche besitzen eine hohe Dichte, dunklere hingegen niedrigere Dichte. Der ETD-Modus dient zur Detektion der Sekundärelektronen. Dieser ist besonders rauscharm und besitzt eine große Bandbreite an auswertbaren Elektronen.

Zusätzlich war auch eine Anlage zur Detektion von charakteristischer Röntgenstrahlung, mittels einer energiedispersiven Röntgenmikroanalyse (EDX-Analyse) von Oxford Instruments, Programm Inca, zur Analyse der chemischen Zusammensetzung der Probe vorhanden. Die Analyse kann für einzelne Punkte, aber auch für einen ausgewählten Bereich, durchgeführt werden. Abbildung 3-4 zeigt das REM und die PC-Einheit.



Abbildung 3-4: REM und PC-Einheit am Lehrstuhl für Gießereikunde.

3.4 Versuchsdurchführung mit dem Testwerkzeug

Zur Herstellung der Abgüsse wurden 160 kg einer AlSi9Cu3(Fe) -Legierung in einem widerstandbeheizten Schmelzofen der Marke Naber T80H eingeschmolzen. Nach dem Schmelzvorgang erfolgte zur Schmelzereinigung eine 10 min. Rotationsentgasung (Impellerbehandlung) durch Argon 5.0 mit einer Durchflussmenge von 6 l/min, um gelösten Wasserstoff und vorhandene nichtmetallische Partikel (Oxide) an der Schmelzoberfläche abzuscheiden. Das Rotorentgasungsgerät der Marke Foseco FDU-Mini-Degasser ist in Abbildung 3-5 dargestellt.



Abbildung 3-5: Rotorentgasungsgerät zur Schmelzereinigung am ÖGI.

Zur Kontrolle der Schmelzereinheit und der qualitativen Kontrolle des Gasgehalts wurde eine DI-Messung der Schmelze durchgeführt. Das Unterdruckdichteprobe-Gerät, kurz UDIP, der Marke MK Industrievertretungen, ist in Abbildung 3-6 abgebildet. Zur Bestimmung des DI wurden zwei Schmelzproben entnommen. Eine Probe erstarrt im UDIP unter Vakuum bei normiert reduziertem Druck (80 mbar). Bei Anwesenheit von gelöstem Gas wird die Probe aufgewölbt, da das gelöste Gas frei wird und sich ausdehnt. Das Gas in der Probe bewirkt eine Verringerung der Dichte. Die zweite Probe erstarrt unter atmosphärischem Druck. Nach dem archimedischen Prinzip kann die Dichte der beiden Proben mit einer Waage bestimmt werden.

$$DI = \frac{D_{atm} - D_{80mbar}}{D_{atm}} * 100(\%) \quad (4)$$

In Gleichung (4) ist die Berechnung des DI dargestellt. Der DI lässt Rückschluss auf den Wasserstoffgehalt und darüber hinaus auf Verunreinigungen der Schmelze zu. Es gilt je kleiner der DI, desto wasserstoffärmer ist die Schmelze [4].

Der DI bei den Gießversuchen betrug bei der ersten Messung 1,0 %, welches einem guten, für die Gießereipraxis typischen Wert entspricht.



Abbildung 3-6: UDIP-Gerät am ÖGI.

Die Gießversuche wurden auf einer echtzeitgeregelten Kaltkammer-Druckgießmaschine der Marke Bühler SC D/53 (siehe Abbildung 3-7), mit einer temperierten Gießkammer der Fa. Brondolin, durchgeführt. Die Schließkraft beträgt maximal 5,3 MN. Ein Kolbenringsatz am Gießkolben gewährleistet einen geringeren Trennmittelintrag durch die Kolbenschmierung. Zur Temperierung des Druckgieß-Werkzeugs und der Gießkammer standen zwei 2-Kreis Öl-Temperiergeräte, der Marke Robamat Thermocast 5212 und Regloplas 300 LD, zur Verfügung. Die Formtemperatur betrug 200°C bzw. jene der Gießkammer 280°C. Die Dosierung und das Eingießen in die Gießkammer der Schmelze erfolgten über einen SPS-gesteuerten Schöpflöffel-Roboter der Marke Müller & Weingarten. Die Gießtemperatur der Schmelze betrug 705°C. Insgesamt wurden 56 Proben, inkl. drei Anfahrteile je Variante, mit fünf unterschiedlichen Parameter-Einstellungen (siehe Tabelle 3-1), abgegossen. In Abbildung 3-8 ist die Aufnahme eines gesamten Abgusses dargestellt.

Für die Kühlung der Kerne (Warmarbeitsstahl 1.2343) kam ein Verteilerrohr zum Einsatz. Kühldauer und Startzeitpunkt der Kernkühlung, basierend auf empirischen Daten, wurden auf 4 Sekunden, mit einer Verzögerungszeit von 1 Sekunde ab Schussauslösung, gesetzt. In Variante 3 kam keine Kernkühlung zum Einsatz. Zur Ermittlung der Oberflächentemperatur der Form bzw. um den Temperaturverlauf innerhalb eines Zyklus zu kontrollieren, wurden Thermografie-Aufnahmen mit einer Wärmebildkamera der Marke FLIR ThermoCam A320 gemacht.



Abbildung 3-7: Kaltkammer-Druckgießmaschine Bühler SC D/53 am ÖGI.

Tabelle 3-1: Gießparameter-Varianten der Versuchsreihe.

Variante	Nachdruck [bar]	Gießkolbengeschwindigkeit [m/s]
1	800	1,0
2	800	3,5
3	800	2,0
4	1000	2,0
5	400	2,0



Abbildung 3-8: Aufnahme eines gesamten Abgusses.

3.5 Untersuchungen für die Industrie

Im Rahmen des Projektes COIN (Cooperation and Innovation) wurden Serienbauteile verschiedener Firmen aus der Industrie hinsichtlich Einfluss und Effizienz des Squeezens untersucht. Dabei sollen die lokalen Gefügeeigenschaften des nachverdichteten Bereichs eruiert und gegebenenfalls Maßnahmen bzw. Lösungsvorschläge zur Verbesserung erarbeitet werden.

3.5.1 Lenkergehäuse Fa. TCG Unitech

3.5.1.1 Untersuchte Proben

Bei dem, von der Fa. TCG Unitech, Kirchdorf, zur Untersuchung bereitgestellten Druckgussteil (Al-Si9Cu3(Fe)-Legierung) handelt es sich um ein Lenkergehäuse,

welches an zwei Stellen, die sich in derselben Formteilung befinden, lokal nachverdichtet wurde. Das Squeezeen erfolgte in beiden Bereichen direkt, welche bei der anschließenden Nacharbeitung z. T. ausgespindelt werden. In Abbildung 3-9 ist eine Gesamtaufnahme des untersuchten Bauteils und der zwei gesqueezezten Bereichen (gekennzeichnet mit SP1 und SP2) dargestellt.

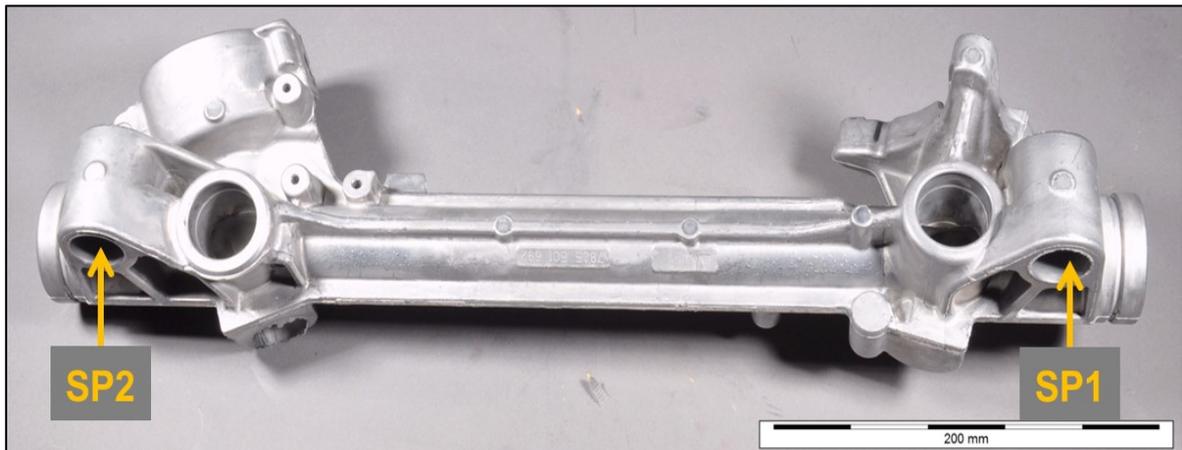


Abbildung 3-9: Gesamtübersicht Lenkergehäuse mit Squeeze-Positionen SP1 und SP2.

Zu Versuchszwecken wurden die Parameter der Squeeze-Einrichtung hinsichtlich Squeeze-Druck (Systemdruck), Einfahrzeitpunkt und Squeeze-Dauer, sowie die Einfahrtgeschwindigkeit variiert. Die Versuchsreihe umfasste fünf verschiedene Einstellmöglichkeiten des jeweiligen Parameters, der sich je an einer Standardeinstellung orientiert, d. h. dass in den Versuchsreihen jeweils nur ein Parameter (Zeit, Druck oder Geschwindigkeit), vom Standardwert abweichend, systematisch variiert wurde (siehe Kapitel 4.1, Tabelle 4-1). Insgesamt standen 26 Gussteile, je zwei pro Parametervariation, zur Untersuchung zur Verfügung.

Nach einer groben Zerteilung der Gussteile in zwei Bereiche erfolgte eine CT-Untersuchung des Squeeze-Bereichs (Scan Bereich Abbildung 3-10). An den Proben wurde ein Fast-Scan durchgeführt und anschließend 2D-Schichtvideos der Proben erstellt bzw. 3D-Modelle rekonstruiert. Weiters wurde bei Proben, bei denen Parameterbedingt ein vermehrtes Fehleraufkommen vermutet wurde, eine Defektanalyse (*Porositätsmapping*) erstellt.

Für metallografische Untersuchungen des Gefüges erfolgte eine weitere Zerteilung. Die Lage der Schliffebene für die untersuchten SP1 Squeeze-Bereiche ist der Abbildung 3-10 zu entnehmen.

Um genauere Erkenntnisse über die Beschaffenheit des Gefüges und dessen Zusammensetzung in ausgesuchten Bereichen zu erlangen, wurde ein Schliff auf dem REM untersucht.

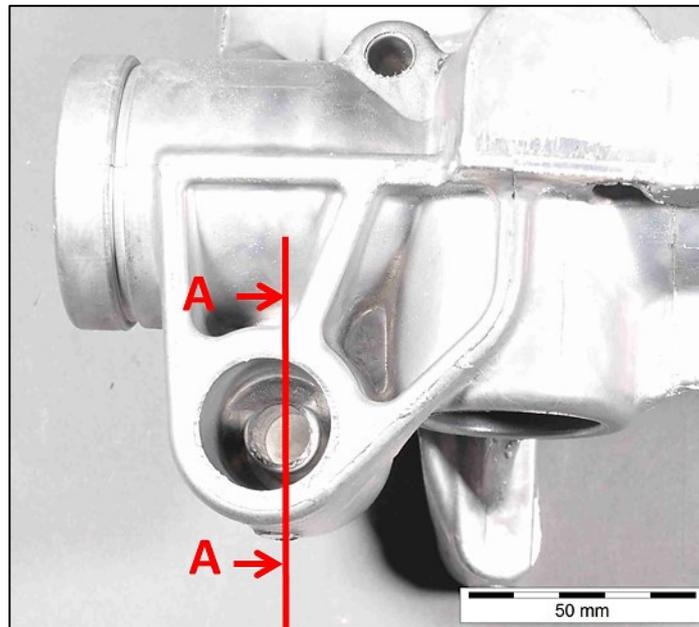


Abbildung 3-10: Detailaufnahme SP1, eingezeichnete Lage der Schliifebene.

3.5.2 Getriebegehäuse Fa. ADG

3.5.2.1 Untersuchte Proben

Bei den von der Fa. ADG, Gleisdorf, zur Untersuchung bereitgestellten Gussteilen aus einer Al-Si9Cu3(Fe)-Legierung handelt es sich um ein Getriebegehäuse. Die Form besteht aus zwei Nestern. Das Gussteil wurde, in einer Form mit zwei Nestern, an einer Stelle über ein Reservoir indirekt nachverdichtet. Eine Gesamtübersicht eines Gussteils 1 (GT1) mit Squeeze-Reservoir, dem Scanbereich und der Schliiflage, ist in Abbildung 3-11 zu sehen.

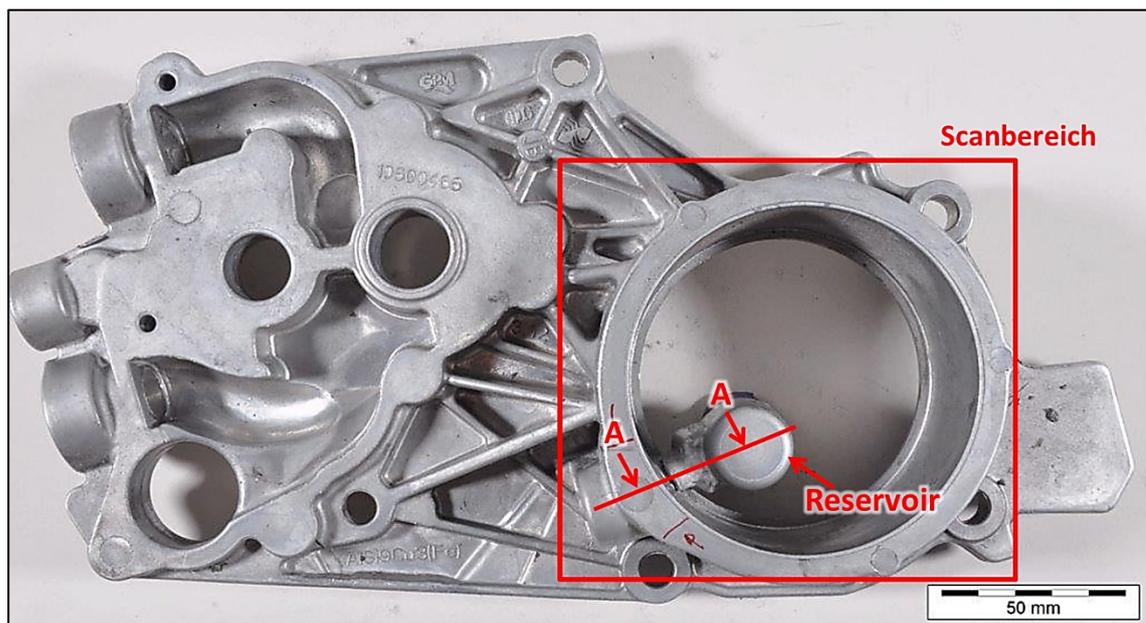


Abbildung 3-11: Gesamtübersicht GT1 mit eingezeichnetem Scanbereich und Schliiflage.

Insgesamt standen drei Varianten des Gussteils für die Untersuchung bereit. Bei Variante 1, im Folgenden GT1 bezeichnet, erfolgte keine lokale Nachverdichtung bzw. bei Variante 2 (GT2) ein indirektes Squeezzen, mit einem Pindurchmesser von 12 mm. Die Squeeze-Parameter sind: 8 bis max. 12 mm Einfahrtiefe, 1200 – 1500 bar Squeeze-Druck an der Spitze und Einfahrzeitpunkt drei Sekunden nach der Schussauslösung.

Zusätzlich wurden Abschnitte des gesqueezten Bereichs, stichprobenartig ausgewählter Gussteile aus der laufenden Produktion, die eine firmeninterne visuelle Gefügebeurteilung durchliefen, metallografisch eingehender untersucht. Dabei wurden speziell Proben mit großer Abweichung vom Vorgabewert, aber auch für in Ordnung befundene Proben, untersucht. Die erhaltenen Daten der visuellen Beurteilung der Fa. ADG, Gleisdorf, wurden ebenfalls ausgewertet.

Nach einer groben Zerteilung der Gussteile erfolgte eine CT-Untersuchung mittels Fast-Scan. Es wurden 2D-Schichtvideos der Proben erstellt bzw. 3D-Modelle für ein Porositätsmapping rekonstruiert. Der Scan-Bereich und die Schliiflagen für die nachfolgenden, metallografischen Untersuchungen sind ebenfalls der Abbildung 3-11 zu entnehmen.

Die dritte Variante, abgekürzt GT3, war eine modifizierte Version, bei der anstelle des indirekten Squeezens zwei feine Kerne (Kernstift \varnothing : 12 mm) mit Kernkühlung zum Einsatz kamen. Auch hier wurden zuerst eine CT- und anschließend eine

metallografische Untersuchung vorgenommen. Einen Überblick von GT3, mit Position der Kernstifte und der Schlifflagen 1 & 2, ist in Abbildung 3-12 dargestellt.

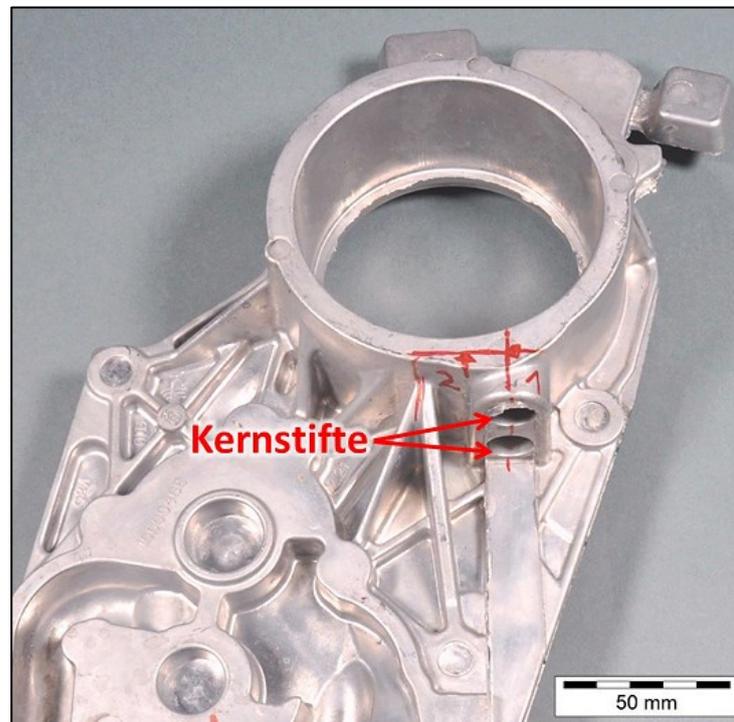


Abbildung 3-12: Gesamtübersicht GT 3, Position der Kernstifte und Schlifflagen 1 und 2.

4 Ergebnisse

4.1 Lenkergehäuse Fa. TCG Unitech

Eine Auflistung (in chronologischer Reihenfolge) der Versuchsreihe ist in Tabelle 4-1 zu sehen. Die Standardeinstellung ist hier hervorgehoben (fett und grau hinterlegt). Die zeitlichen Variationen sind grün, die Systemdrücke rot und die Einfahrgeschwindigkeiten blau hinterlegt.

Tabelle 4-1: Auflistung der Parametervariationen: Standardparameter (fett), Einfahrzeitpunkt bzw. Squeezedauer (grün hinterlegt), Systemdruck (rot hinterlegt) und Geschwindigkeit (blau hinterlegt).

Probe Nr.	Startzeitpunkt SP1 [s]	Squeezedauer SP1 [s]	Startzeitpunkt SP2 [s]	Squeezedauer SP2 [s]	Systemdruck [bar]	Geschwindigkeit [-]
1,2	4,5	4,5	5,5	4,7	110	5
3,4	5,0	4,0	6,0	4,2	110	5
5,6	5,5	3,5	6,5	3,7	110	5
7,8	6,0	3,0	7,0	3,2	110	5
9,10	6,5	2,5	7,5	2,7	110	5
11,12	5,5	3,5	6,5	3,7	60	5
13,14	5,5	3,5	6,5	3,7	85	5
15,16	5,5	3,5	6,5	3,7	135	5
17,18	5,5	3,5	6,5	3,7	160	5
19,20	5,5	3,5	6,5	3,7	110	1
21,22	5,5	3,5	6,5	3,7	110	3
23,24	5,5	3,5	6,5	3,7	110	7
25,26	5,5	3,5	6,5	3,7	110	9

Die in Tabelle 4-1 verwendeten Bezeichnungen der Parameter und Werte werden im Folgenden kurz erklärt.

Die verwendete Zeitangabe des Startzeitpunkts stellt den Zeitraum zwischen Umschaltzeitpunkt auf die dritte Phase und den Squeeze-Beginn dar. Der Zeitraum, der für das Squeezen des Gussteils zur Verfügung steht, beläuft sich in Summe im

SP1-Bereich auf 9,0 und für den SP2-Bereich auf 10,2 Sekunden. Die Einstellungen im Startzeitpunkt und der Squeeze-Dauer wurden in 0,5 Sekundenschritten gegenläufig geändert, d. h. je später der Squeeze-Beginn, desto kürzer ist die Squeeze-Dauer.

Der Systemdruck ist jener Druck, der am Hydraulikzylinder der Squeeze-Einrichtung anliegt. Der tatsächliche Squeeze-Druck ergibt sich aus der Verhältnisrechnung von Hydraulikkolben- (Ø 40 mm) zu Squeeze-Pin Durchmesser (Ø 12mm) und kann aus Tabelle 4-2 entnommen werden.

Die Geschwindigkeit wurde auf einer dimensionslosen Skala, mit Stufen von 1 – 9, der Squeeze-Einrichtung geändert, ohne Angaben bzw. Kenntnis von Zahlenwerten der Einfahrgeschwindigkeit.

Tabelle 4-2: Auflistung der Umrechnung des Systemdrucks auf den tatsächlichen Squeeze-Druck.

	Systemdruck [bar]	Squeeze-Druck [bar]
	60	667
	85	944
	110	1222
Hydraulikkolben: Ø 40 [mm]	130	1444
Squeeze-Pin: Ø 12 [mm]	160	1778

4.1.1 Computertomografie

Der Fast-Scan diente in erster Linie dazu, einen Überblick der Bauteilbeschaffenheit zu erhalten. Des Weiteren wird die Wahl einer geeigneten bzw. exakten Position der Probenentnahme für die Schliffherstellung erleichtert, da dieser aus dem Bereich des größten, vermuteten Fehleraufkommens entnommen werden kann.

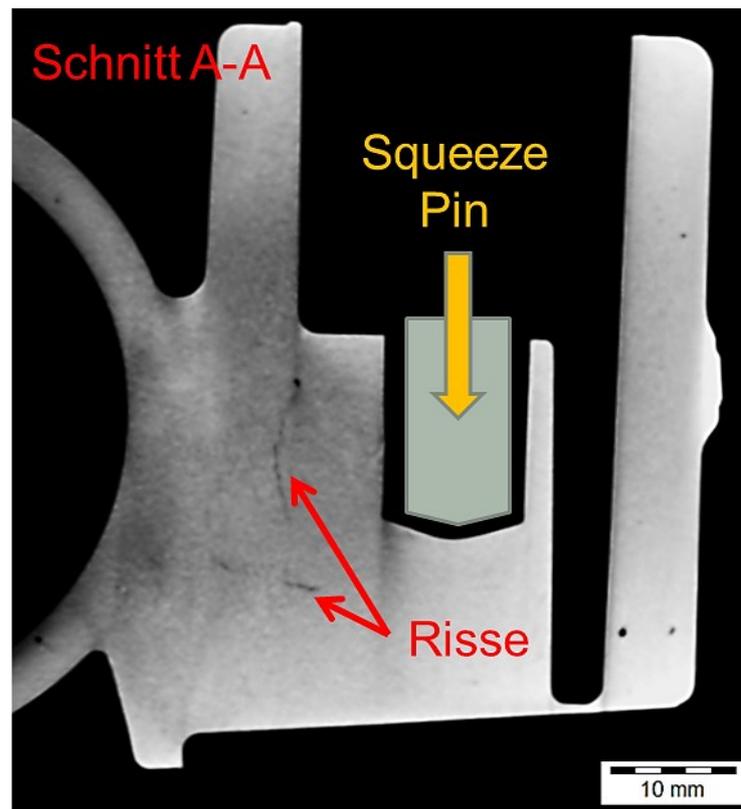


Abbildung 4-1: CT, Probe 10-SP1, 2D Schichtaufnahme (Schnittebene A-A) mit möglichen Rissen und schematischem Squeeze-Pin.

In Abbildung 4-1 ist eine Aufnahme aus dem Schichtvideo der Probe 10-SP1 mit schematischer Darstellung des Squeeze-Pins und möglichen Rissen zu sehen. Aufgrund der maschinellen Anordnung und durch die vom Squeeze-Pin verursachte Krafteinleitung beim Einfahren könnte es sich um Warmrisse handeln. Die Parameter sind Einfahrzeitpunkt bei 6,5 Sekunden und 2,5 Sekunden Squeeze-Dauer, 110 bar Systemdruck und Geschwindigkeit Stufe 5. Der Einfahrzeitpunkt stellt den spätestmöglichen und die Squeeze-Dauer die kürzeste in der Versuchsreihe dar. Diese Parametereinstellung hat bereits zu Beginn der Untersuchung, basierend auf den theoretischen Erkenntnissen (siehe Kap. 1.4) erwarten lassen, dass kein effizientes Squeezing stattfand bzw. mit erheblichen Schädigungen des Gefüges (vermehrtes Rissaufkommen und Porosität) zu rechnen ist. Anhand der Ergebnisse des Fast-Scans in Abbildung 4-1 lässt sich diese Annahme mit hoher Wahrscheinlichkeit bestätigen.

Mithilfe des sogenannten *Porositätsmapping* lassen sich Fehler im Bauteil darstellen. Das Resultat eines Mappings für zwei Gussteile mit unterschiedlichen Parametern ist in

Abbildung 4-2 zu sehen. Die hier detektierbare Fehlergröße richtet sich nach der verwendeten Auflösung. Das Ergebnis des Porositätsmapping ergab für die Probe 5-SP1 ein Gesamtdefektvolumen von 0,01 % bzw. für 11-SP1 0,03 %. Dieser Zahlenwert ergibt sich aus dem Quotient des Volumens der detektierten Fehler, zu dem des gesamten gescannten Bauteils. Daher ist eine Angabe der Porosität ausschließlich für den Squeeze-Bereich faktisch nicht realisierbar. Weiters muss festgehalten werden, dass in der CT keine reale Porosität wiedergegeben werden kann.

Im durchgeführten Fast-Scan Modus beträgt die Auflösung 360 μm Kantenlänge der Voxelereinheit, d. h. der mit der Software detektierbare minimale „Fehler“ liegt bei einem Wert von $\approx 0,05 \text{ mm}^3$. Durch diesen Umstand ist es nicht möglich Mikroporosität zu detektieren bzw. schwierig, lokale Seigerungen, Gefügetrennungen und Dichteunterschiede festzustellen. Die Auflösung wird noch zusätzlich durch Unschärfen im System, wie durch das bereits erwähnte Rauschen, gemindert.

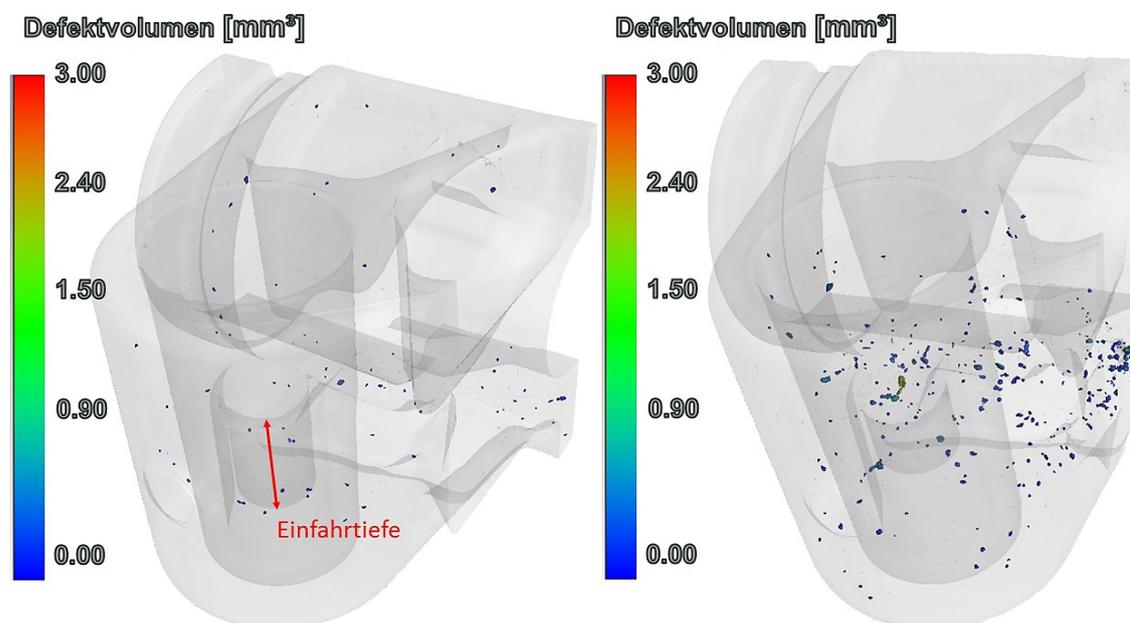


Abbildung 4-2: CT, Probe 5-SP1 (links) und 11-SP1 (rechts), 3D-Modell mit Porositätsmapping.

Wie aus Abbildung 4-2 deutlich hervorgeht, ist die Porosität der Probe 11-SP1 nicht nur im Squeeze-Bereich, sondern auch im gesamten Bauteil um ein Vielfaches höher. Dieser Umstand ist durch einen unzureichenden Squeeze-Druck (60 bar Systemdruck) bedingt und lässt sich daneben an der geringeren Einfahrtiefe des Squeeze-Pins erkennen. Dies lässt auch den Schluss zu, dass der Wirkungsbereich des Squeezens

bei geeigneter Parametereinstellung nicht nur in unmittelbarer Nähe der Squeeze-Einrichtung liegt, sondern auch weiter entfernte Bereiche des Bauteils beeinflusst.

4.1.2 Lichtmikroskopie

Einen Überblick des Schliffes der Probe 1-SP1 bietet Abbildung 4-3. Die darin umrahmten Bereiche stellen Zonen der Verdrängung (gelb) bzw. der Verdichtung (rot) des Squeezers dar. Es ist deutlich sichtbar, dass Material vom Squeeze-Pin in das Bauteil verschoben wurde. Außerhalb der sackähnlichen Verdrängungszone (gelber Bereich) wurde Gas- sowie Schwindungsporosität festgestellt, welche die Grenze des Einflussbereichs der lokalen Nachverdichtung kennzeichnet. Durch die stark komprimierte Struktur des Gefüges im verdichteten Bereich unterhalb des Squeeze-Pins (rot) könnte bei diesen Bedingungen eine Art Thixoforming (-schmieden) stattgefunden haben.

Die Parameter der Probe 1-SP1 sowie aller folgenden untersuchten Proben sind aus Tabelle 4-1 zu entnehmen. In den Detailbereichen 1 und 2 wurden Gefügeuntersuchungen vorgenommen.

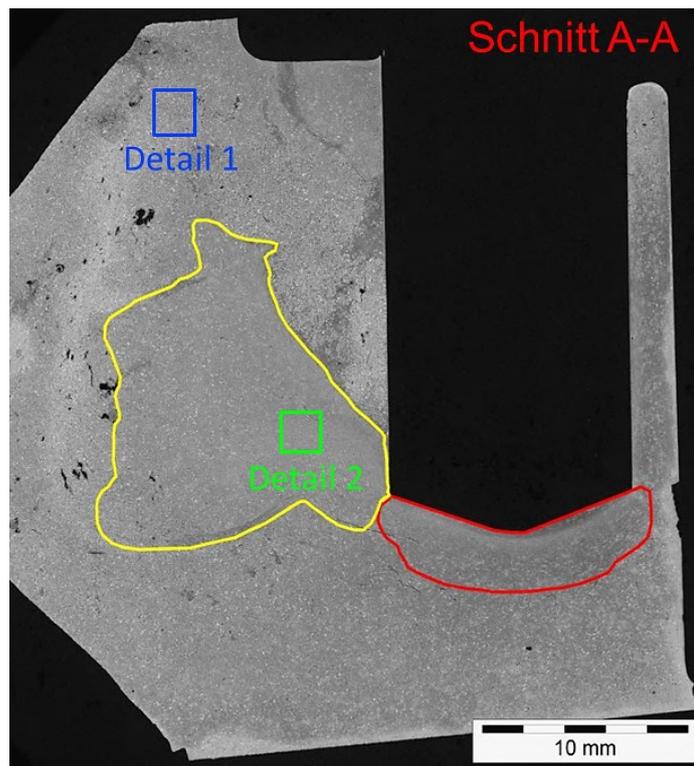


Abbildung 4-3: LM, Übersichtsaufnahme Probe 1-SP1 mit eingezeichnetem Verdrängungsbereich (gelb) und Komprimierungszone unterhalb des Squeeze-Pins (rot); Positionen von Detail 1 und Detail 2.

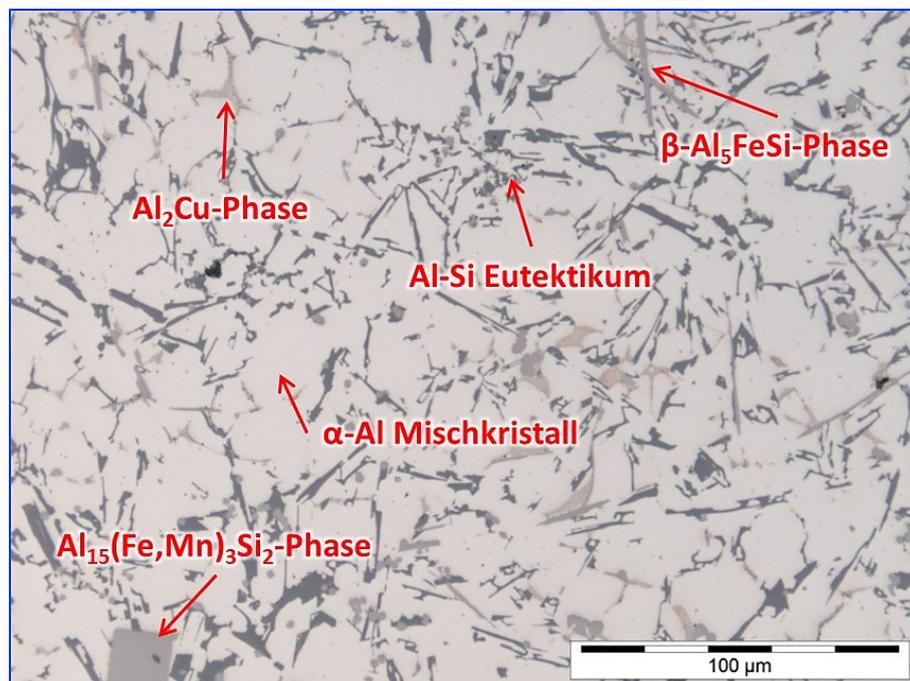


Abbildung 4-4: LM, Probe 1-SP1, Detail 1, vergrößerte Ansicht des unbeeinflussten Bereichs mit Gefügebeschreibung.

In Abbildung 4-4 ist eine vergrößerte Aufnahme von Detailbereich 1 zu sehen. Die Gefügeausbildung ist typisch für eine unveredelte Al226D-Legierung. Das Gefüge setzt sich primär aus α -Al Mischkristallen (weiß) und dem dazwischen liegenden körnigen Al-Si-Eutektikum (grau) zusammen. Daneben wurde die vordendritisch gebildete, polygonal geformte $Al_{15}(Fe,Mn)_3Si_2$ -Phase, die nadelförmige β - Al_5FeSi -Phase, so genannte Eisennadeln, und entartete eutektische Al_2Cu -Phasen detektiert.

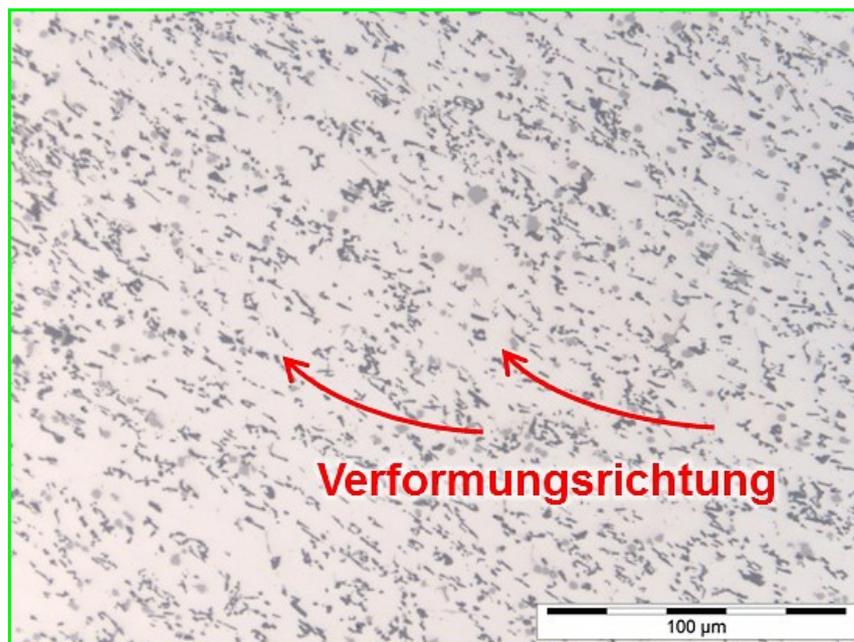


Abbildung 4-5: LM, Probe 1-SP1, Detail 2, vergrößerte Ansicht des verformten Bereichs mit eingezeichneter Verformungsrichtung.

Abbildung 4-5 zeigt den vergrößerten Ausschnitt des Detailbereiches 2 im verformten Gefügebereich. Es liegt ein deutlich feineres Gefüge im Vergleich zu dem unbeeinflussten Bereich vor und es ist keine dendritische Struktur mehr zu erkennen. Besonders auffallend ist, dass sich eine Art Textur in Verformungsrichtung zeigt. Diese, sowie auch die Feinheit, wird vermutlich durch ein Abscheren des Primärgefüges in Verformungsrichtung verursacht.

Im Nachfolgenden sind Abbildungen ausgewählter Schiffe dargestellt, anhand derer sich die auftretenden Phänomene klar zeigen.

In Abbildung 4-6 sind Übersichtsaufnahmen im LM der Probe 10-SP1 (links) und 10-SP2 (rechts) dargestellt. In beiden Squeeze-Bereichen zeigen sich erhebliche Schädigungen des Gefüges. Im Vergleich der Schlißprobe 10-SP1 mit der CT-Aufnahme in Abbildung

4-1 hat sich die Vermutung bzgl. möglicher Risse und Materialtrennungen hier eindeutig bestätigt. Bedingt durch diese massiven Materialtrennungen, die im Bereich der Nachbearbeitung liegen, ist mit Oberflächenausbrüchen zu rechnen. Nach Gesprächen mit der Fa. TCG Unitech, Kirchdorf, wurden tatsächlich bei der Nachbearbeitung z. T. erhebliche, makroskopische Schädigungen der bearbeiteten Oberfläche festgestellt.

Mögliche Ursache für diesen schwerwiegenden Fehler ist, dass der Einfahrzeitpunkt des Squeezers zu spät erfolgte und es durch die fortgeschrittene Erstarrung im Squeeze-Bereich zu massiven Verformungen verbunden mit Gefügetrennungen kam. Aufgrund der Topografie der Materialtrennung handelt es sich mit hoher Wahrscheinlichkeit um Warmrisse. Eine weitere Möglichkeit der Rissbildung kann das Aufschrumpfen der erstarrenden Schmelze an den Squeeze-Pins sein, wodurch beim möglicherweise auch zu frühen (vorzeitigen) Ausziehen des Pins, Zugspannungen induziert werden und folglich Materialtrennungen (Warmrisse) im Gefüge auftreten können.

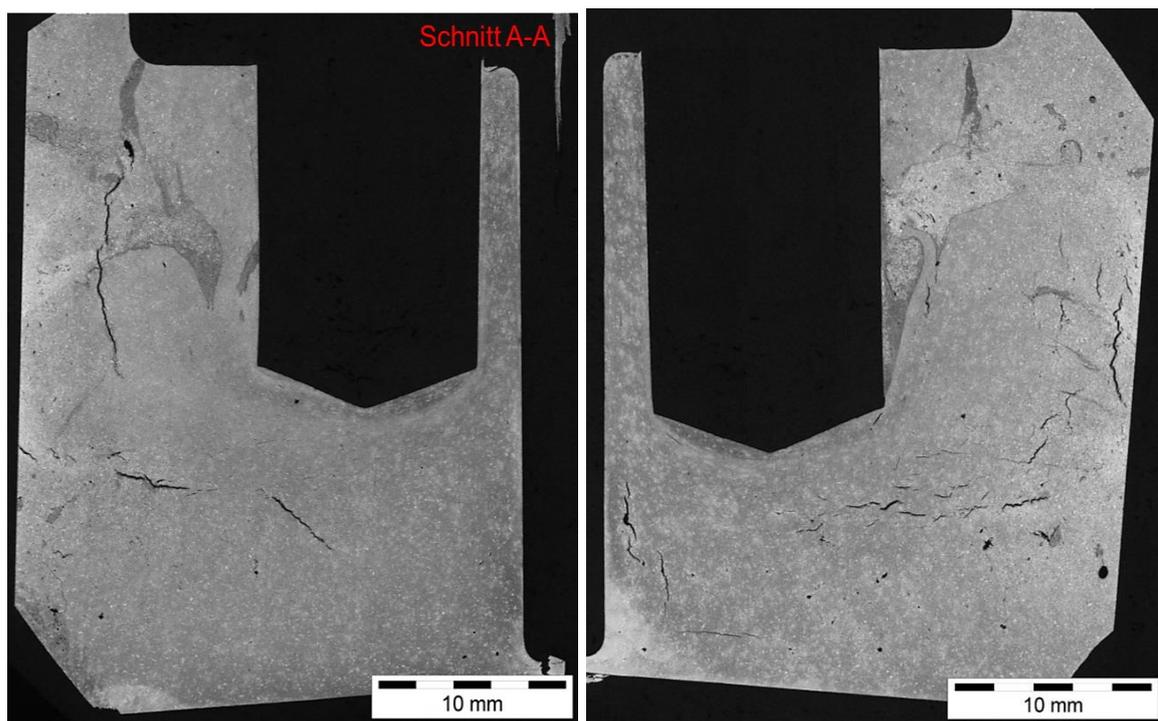


Abbildung 4-6: LM, Übersichtsaufnahme Probe 10-SP1 (links) und Probe 10-SP2 (rechts).

Abbildung 4-7 zeigt einen Überblick der Schliiffprobe 11-SP1 (links) und 11-SP2 (rechts). Es ist nur eine geringe Einfahrtiefe des Squeeze-Pins und kaum ein Verdrängungsbereich zu erkennen, wodurch Gefügeinhomogenitäten gepaart mit

starkem Porositätsaufkommen detektiert wurden. Ursache dafür ist ein ungenügender Squeeze-Druck, sodass keine Verdichtung stattfand.

Ein gutes Ergebnis liefert Probe 5-SP1, welche in Abbildung 4-8, mit eingezeichnetem ROI (Region of Interest), dargestellt ist. Im Vergleich zu Probe 1-SP1 oder 10-SP1 (Abbildung 4-3 bzw. Abbildung 4-6), liegt ein dichteres Gefüge mit geringerer Rissneigung in den Verdrängungszonen vor. Eine Porositätsmessung ergab 0,1 % (roter ROI) bzw. 0,2 % (grüner ROI). Die Messungen liefern, kritisch betrachtet, ein verfälschtes Ergebnis aufgrund erfasster Risse im ROI. Dennoch kann das Gefüge als dicht angesehen werden.

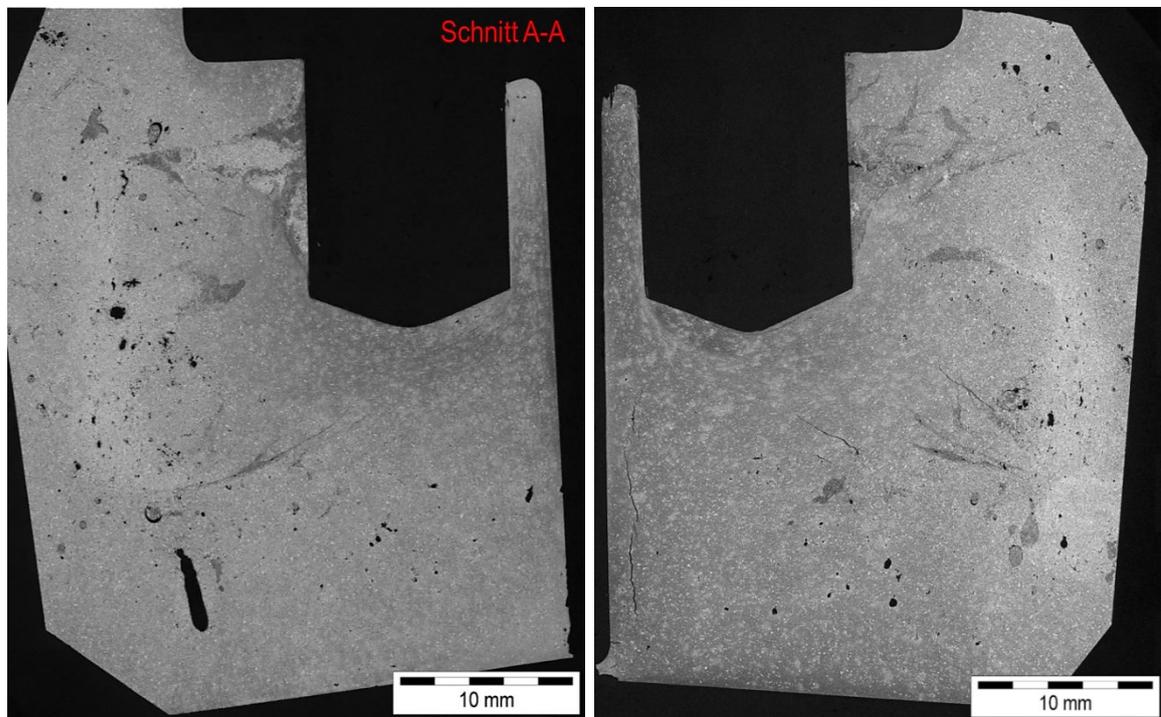


Abbildung 4-7: LM, Übersichtsaufnahme Probe 11-SP1 (links) Probe 11-SP2 (rechts).

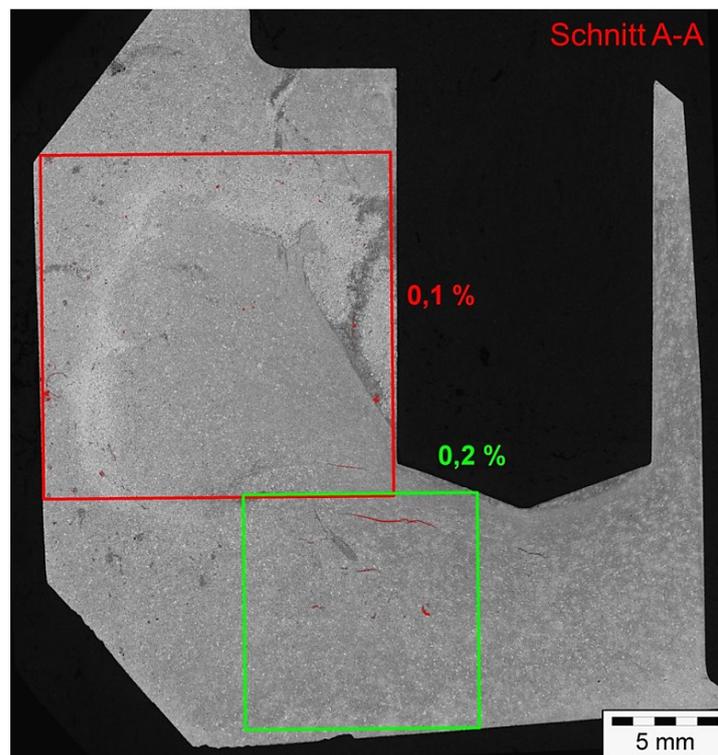


Abbildung 4-8: LM, Übersichtsaufnahme Probe 5-SP1, Porositätsmessung nach VDG P201 mit ROI.

In Abbildung 4-9 ist eine Zusammenstellung ausgesuchter SP1-Proben dargestellt. Es sind hier jeweils Übersichtsaufnahmen im Lichtmikroskop der Schriffe mit den unterschiedlichen Parametern zu sehen. In der ersten Reihe ist die steigende Einfahrverzögerung, mit späterem Einfahrzeitpunkt und kürzerer Squeeze-Dauer, von links nach rechts, abgebildet. Die weiße Linie zeigt, als optische Hilfe, die Eindringtiefe des Squeeze-Pins in das Reservoir und dient als Indikator für den Squeeze-Erfolg. Anhand dieser Linien ist deutlich zu sehen, dass je später der Squeeze-Vorgang gestartet wird, der Einfahrweg umso geringer ist. Bereits in diesen Übersichtsaufnahmen ist zu erkennen, dass sich die Qualität des gesqueezten Bereichs abweichend vom Standardparameter-Satz bedeutend ändert. Bei zu frühem Squeezem (links vom Standardparameter-Satz) ist mit vermehrter Porosität zu rechnen, bzw. bei zu spätem Einfahren (rechts vom Standardparameter-Satz) kommt es zu massiver Rissbildung (Warmrisse) und Materialtrennungen. Auch deutlich zu sehen sind Gefügeinhomogenitäten (dunklere Bereiche im Schliff), die sich im bzw. über dem Squeeze-Bereich ausbilden und mit einer weiteren Qualitätsminderung des Bauteils einhergehen.

Die zweite Reihe zeigt jene Proben bei denen der Squeeze-Druck (steigender Druck von links nach rechts) geändert wurde. Hier verhält sich die Eindringtiefe umgekehrt zur Einfahrzeit, d. h. je höher der Druck desto größer die Eindringtiefe. Hohe Drücke können meist als Vorteil angesehen werden, da eine höhere Verdichtung des zu verdichteten Bereichs erreicht werden kann. Es hat sich gezeigt, dass zu niedrige Drücke (speziell 60 bar Systemdruck) eine mangelhafte Verdichtung bewirken, was mit massiver Porosität einhergeht. Mit Drücken, die den Standardwert überschreiten, werden zwar größere Einfahrwege erreicht, die Gussqualität des Squeeze-Bereichs zeigt jedoch keine wesentliche Verbesserung. Somit sind adäquate Drücke erstrebenswert bzw. höhere überflüssig, da diese das Werkzeug (Squeeze-Pin) nur unnötig belasten.

In der dritten Reihe sind Aufnahmen der steigenden Einfahrgeschwindigkeit (v.l.n.r.) abgebildet. Aus diesen geht deutlich hervor, dass sich bis auf die erste Stufe der Geschwindigkeit keine markanten Unterschiede, bzgl. Einfahrweg und vor allem in der Qualität des Gefüges, in den Variationen der Parameter ergeben. Bei Stufe 1 (erstes Bild) kann beobachtet werden, dass kein signifikantes Squeezen stattfand und dadurch das Fehleraufkommen erheblich gesteigert wird. Eine höhere Einfahrgeschwindigkeit als der Standardparameter hat jedoch kaum einen erwähnenswerten Einfluss auf die Eindringtiefe des Squeeze-Pins.

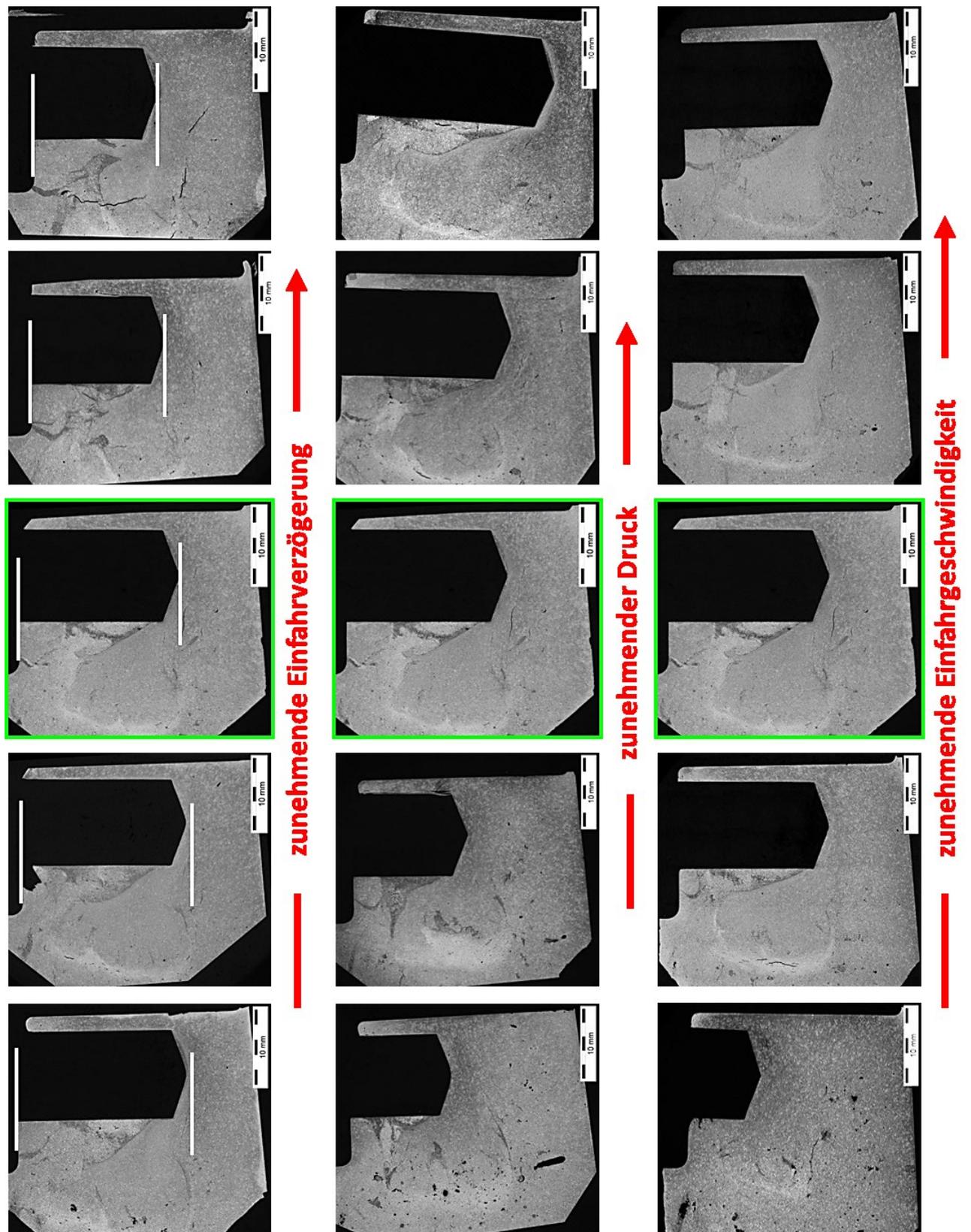


Abbildung 4-9: LM, Übersicht SP1-Proben (Schnitt A-A), Parametervariation Einfahrverzögerung (oben), Druck (Mitte) und Geschwindigkeit (unten); grün umrandet stellt den Standardparameter dar, weiße Markierungen zur Verdeutlichung des Einfahrweges.

Die Auswertung der metallografischen Untersuchungen erfolgte durch eine visuelle Qualitätsbewertung aller einzelnen Schlitze nach Schulnotensystem (1 – sehr gut, 5 – ungenügend). Diese Methode wurde gewählt, da Porosität und Risse einen zusammenhängenden Cluster bilden bzw. im selben Messbereich auftreten, welches das Ergebnis der Porositätsauswertung nach VDG verfälscht hätte.

Die grafische Darstellung der visuellen Qualitätsauswertung ist in den folgenden drei Diagrammen zu sehen. In Abbildung 4-10 ist das Resultat der Modifikationen von Startzeitpunkt und Squeeze-Dauer, in Abbildung 4-11 die Variationen des Systemdrucks und in Abbildung 4-12 die unterschiedlichen Einfahrgeschwindigkeiten des Squeeze-Pins zu sehen. Daneben sind in jedem Diagramm die Standardparameter der Squeeze-Einrichtung farblich hervorgehoben. Generell kann gesagt werden, dass bei allen Versuchen im zweiten Squeeze-Bereich (SP2) schlechtere Ergebnisse, im Vergleich zu SP1, festgestellt wurden. Dies ist vermutlich bedingt durch größere Wandstärken im umliegenden Bereich von SP2.

Die Einstellungen der Standardparameter haben im ganzen Versuchsfeld stets das beste Ergebnis erzielt. Dies lässt den Schluss zu, dass bereits im Vorfeld der Untersuchungen firmenintern eine empirische Optimierung der Squeeze-Parameter durchgeführt wurde.

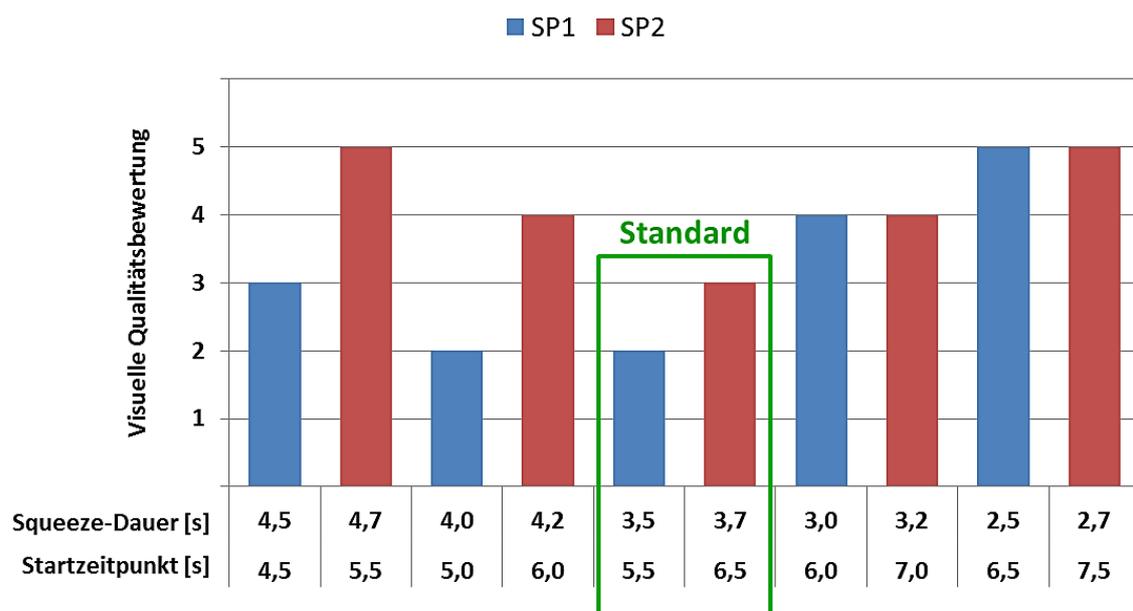


Abbildung 4-10: Ergebnisse der visuellen Qualitätsbewertung der Zeitvariationen von SP1 (blau) und SP2 (rot), benotet nach Schulnotensystem (1-sehr gut, 5-ungenügend) und eingezeichnetem Standardparameter.

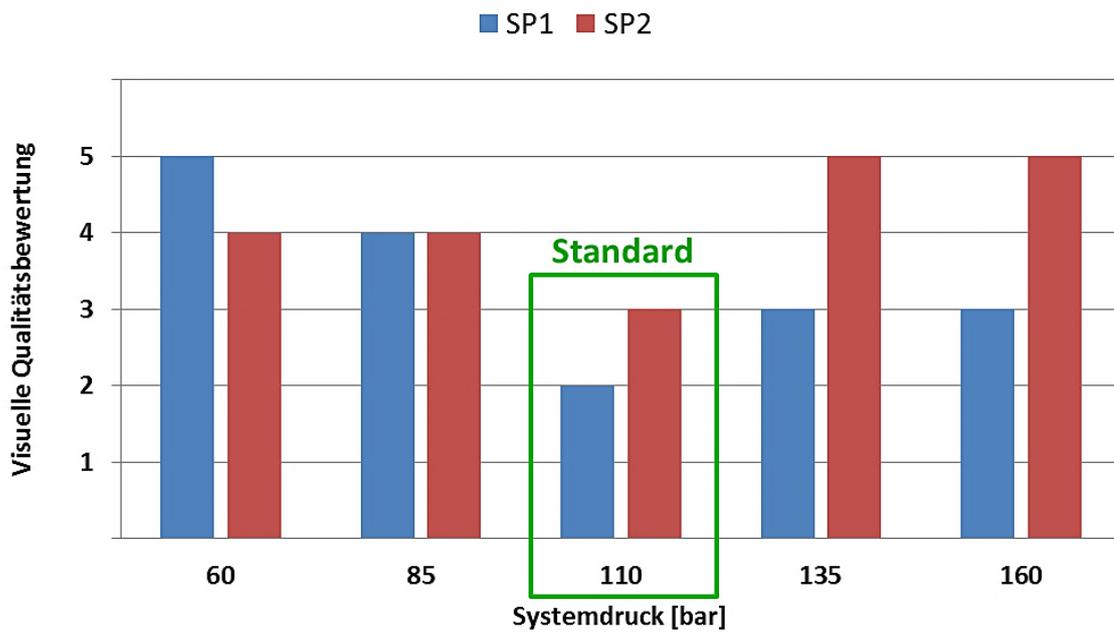


Abbildung 4-11: Ergebnisse der visuellen Qualitätsbewertung der Systemdruckvariationen von SP1 (blau) und SP2 (rot), benotet nach Schulnotensystem (1-sehr gut, 5-ungenügend) und eingezeichnetem Standardparameter.

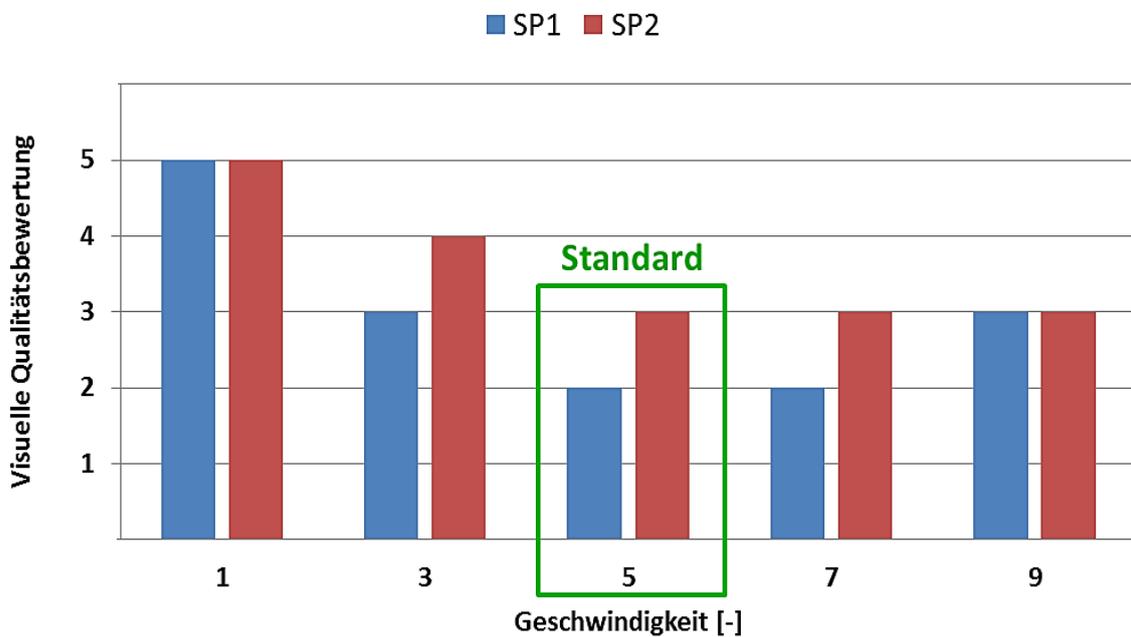


Abbildung 4-12: Ergebnisse der visuellen Qualitätsbewertung der Geschwindigkeitsvariationen von SP1 (blau) und SP2 (rot), benotet nach Schulnotensystem (1-sehr gut, 5-ungenügend) und eingezeichnetem Standardparameter.

Aufgrund des erkennbaren Zusammenhangs der Art des Fehleraufkommens im Squeeze-Bereich und den unterschiedlichen Parametereinstellungen (siehe Abbildung 4-9) wurde eine quantitative Fehleranalyse durchgeführt. Bei dieser Auswertungsmethode wurde durch Zählen der Fehlstellen zwischen Porosität (Schrumpfungs- bzw. Gasporosität) und Rissen (Warmrissen) differenziert.

Der untersuchte Bereich (ROI) der Proben ist in Abbildung 4-13 dargestellt. Mithilfe der Bildanalysesoftware *analySIS auto 5.1* wurden die Fehlerstellen zur besseren Sichtbarkeit eingefärbt. Dies erfolgte über den Formfaktor, der die Rundheit eines Partikels angibt, d. h. je kleiner der Formfaktor desto länglicher ist das Partikel. Der Formfaktorgrenzwert für einen Riss (blau) wurde auf 0,3 gesetzt, darüber wurde die Fehlstelle somit als Porosität (grün) detektiert.

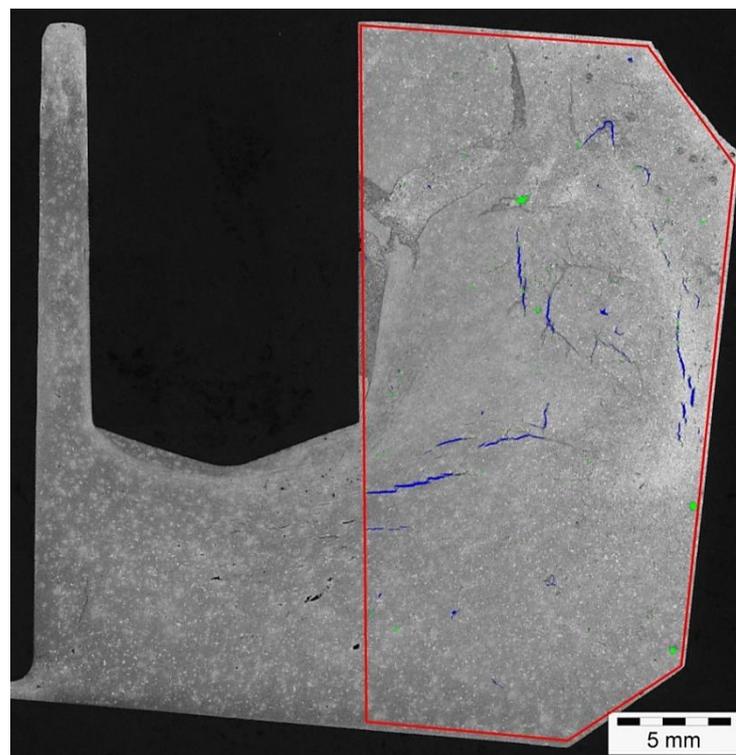


Abbildung 4-13: LM, Übersichtsaufnahme Probe 9-SP2, eingekreister ROI für quantitative Auswertung.

In Tabelle 4-3 ist das Ergebnis einer quantitativen Porositäts- und Rissauswertung und die zugehörige Einteilung in Fehlerklassen des Standardparametersatzes aufgelistet.

Tabelle 4-3: Ergebnis einer quantitativen Porositäts- und Rissauswertung von SP1 des Standardparametersatzes.

Fehlerklasse	Porosität – Durchmesser [mm]	Anzahl	Risslänge [mm]	Anzahl
1	0,1 - 0,25	20	n.a.	-
2	0,25 - 0,5	1	0,25 - 0,5	5
3	0,5 - 1,0	1	0,5 - 1,0	3
4	1,0 - 2,0	1	1,0 - 2,0	1
5	> 2,0	0	2,0 - 4,0	0

Ein Auswertungsschema der Druck-Variationen von SP1 ist in Abbildung 4-14 und jene von SP2 in Abbildung 4-15 zu sehen. In den Diagrammen ist der Mittelwert des Fehleraufkommens über dem Systemdruck aufgetragen. Die absolute Fehleranzahl von SP2 liegt hier deutlich über der von SP1.

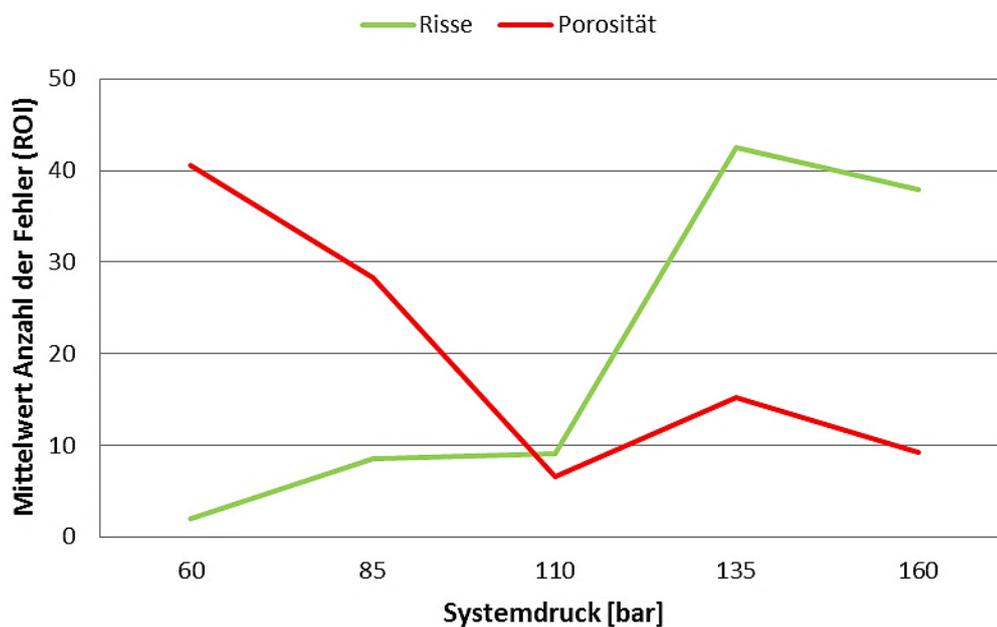


Abbildung 4-14: Ergebnis der quantitativen Fehlerauswertung der Druckvariationen von SP1.

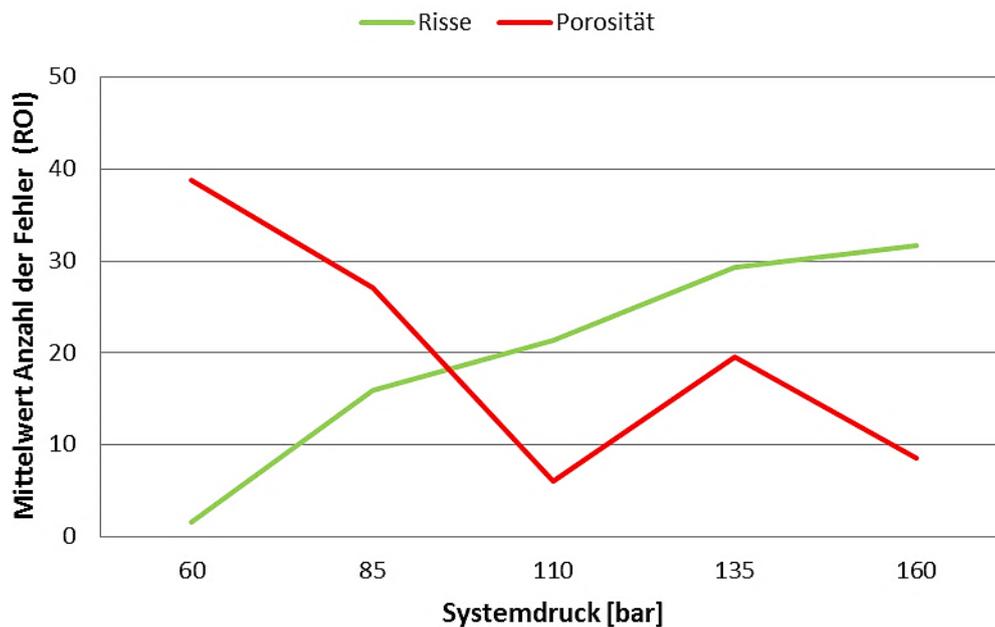


Abbildung 4-15: Ergebnis der quantitativen Fehlerauswertung der Druckvariationen von SP2.

Die Höhe des Fehleraufkommens bzw. die Fehlergröße entscheidet hier über den Ausschuss des Bauteils, z. B. nach VDG P201, bzw. über das Bauteilversagen. In beiden Ergebnissen ist ein deutlicher Zusammenhang zwischen Porositäts- und Rissaufkommen in Abhängigkeit des Squeeze-Drucks gegeben. Bei niedrigem Squeeze-Druck ist der Anteil an Porosität um ein Vielfaches größer im Vergleich zur Häufigkeit von Rissen. Bei hohen Drücken ist genau gegenseitiges der Fall, sodass die relative Anzahl von Rissen jene der an Porosität wesentlich übersteigt. Eine Interpretationsmöglichkeit dafür ist, dass bei niedrigem Druck der Wirkungsbereich des Squeeze-Pins zu gering ist um Porosität zu reduzieren. Bei hohem Druck hingegen wird das Gefüge zwar lokal verdichtet, jedoch aufgrund der auftretenden Kräfte werden Warmrisse induziert, die aufgrund der fortgeschrittenen Erstarrung nicht mehr ausgeheilt werden können. Beim Systemdruck von 110 bar ergibt sich jeweils für SP1 und SP2 der geringste kumulierte Wert von Riss- und Porositätsaufkommen, wodurch auch in dieser Auswertung der Standardparametersatz das beste Ergebnis liefert.

Eine Möglichkeit einen weiteren Zusammenhang zwischen Porositäts- und Rissaufkommen zu zeigen, ist schematisch in Abbildung 4-16 dargestellt. Darin ist erneut dieselbe Tendenz (grau-strichlierte Linie) zu erkennen, dass bei niedrigen Drücken eine hohe Porendichte festzustellen ist bzw. mit steigendem Druck die Risshäufigkeit steigt. Die schematisch eingezeichnete schwarz-strichlierte Linie deutet eine Art Übergangsbereich (von Porositäts- zu erhöhtem Rissaufkommen bei moderaten

Drücken) im Fehlererscheinungsbild an. Aufgrund der geringen Anzahl auszuwertender Proben ist diesem Ergebnis nur eine bedingte Aussagekraft beizumessen.

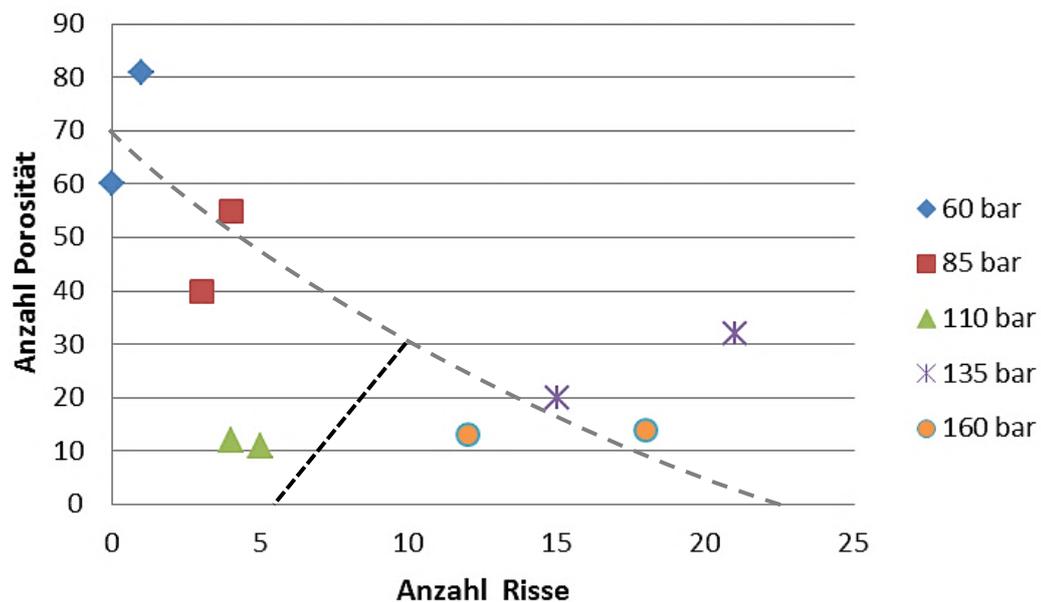


Abbildung 4-16: Schematische Auswertung mit Einzelwerten der quantitativen Auswertung von unterschiedlichen Squeeze-Drücken bei SP1.

Zur Verdeutlichung sind in Abbildung 4-17 zwei Schliffbilder des Gefügebereichs mit dem niedrigsten (links) und dem höchsten (rechts) Squeeze-Druck dargestellt. Darin ist eindeutig das Fehleraufkommen im Squeeze-Bereich ersichtlich.

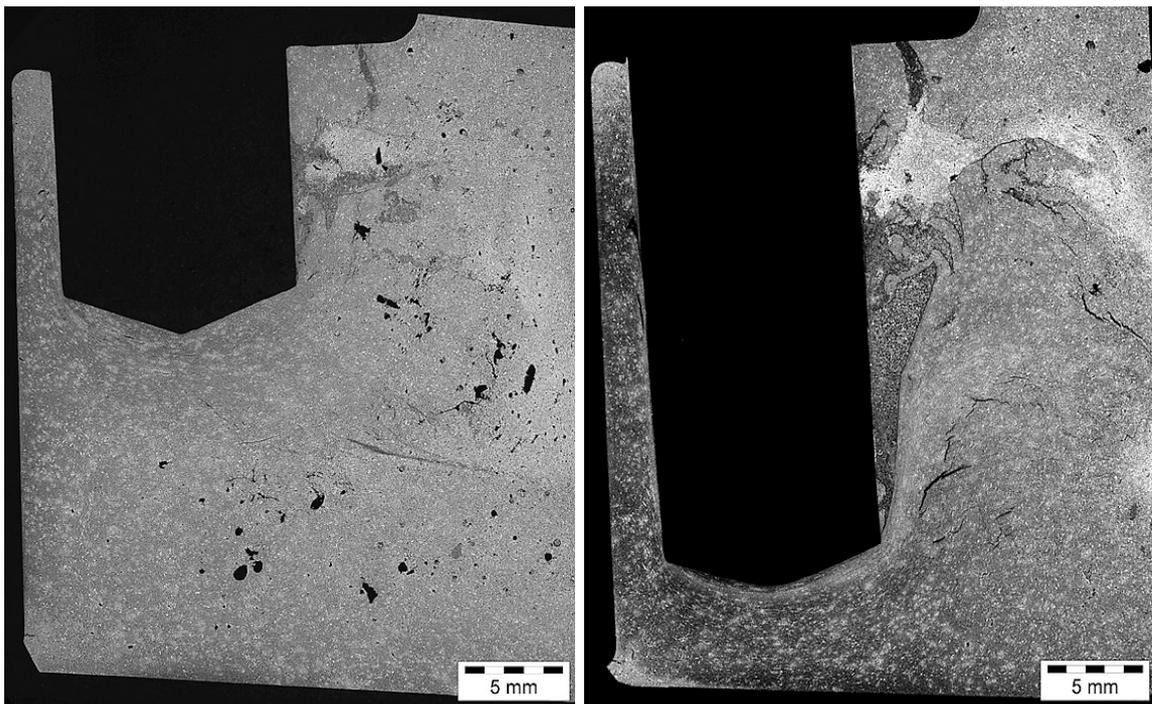


Abbildung 4-17: LM, Übersichtsaufnahme Probe 12-SP2 (links) und 18-SP2 (rechts), unterschiedliches Fehleraufkommen in Abhängigkeit vom Squeeze-Druck (links: 60 bar, rechts: 160 bar).

Die Auswertung der Zeit- und Geschwindigkeitsversuchsreihe brachte kein aussagekräftiges Ergebnis, da kein eindeutiger Trend zwischen Porosität und Risse in Abhängigkeit des variierenden Parameters feststellbar war. Dies lässt den Schluss zu, dass die Manipulation des Squeeze-Drucks den größten Einfluss auf die Gefügebeschaffenheit hat.

4.1.3 Rasterelektronenmikroskopie

Ein Überblick bzw. die Analysenstellen der REM-Untersuchungen ist in Abbildung 4-18 dargestellt.

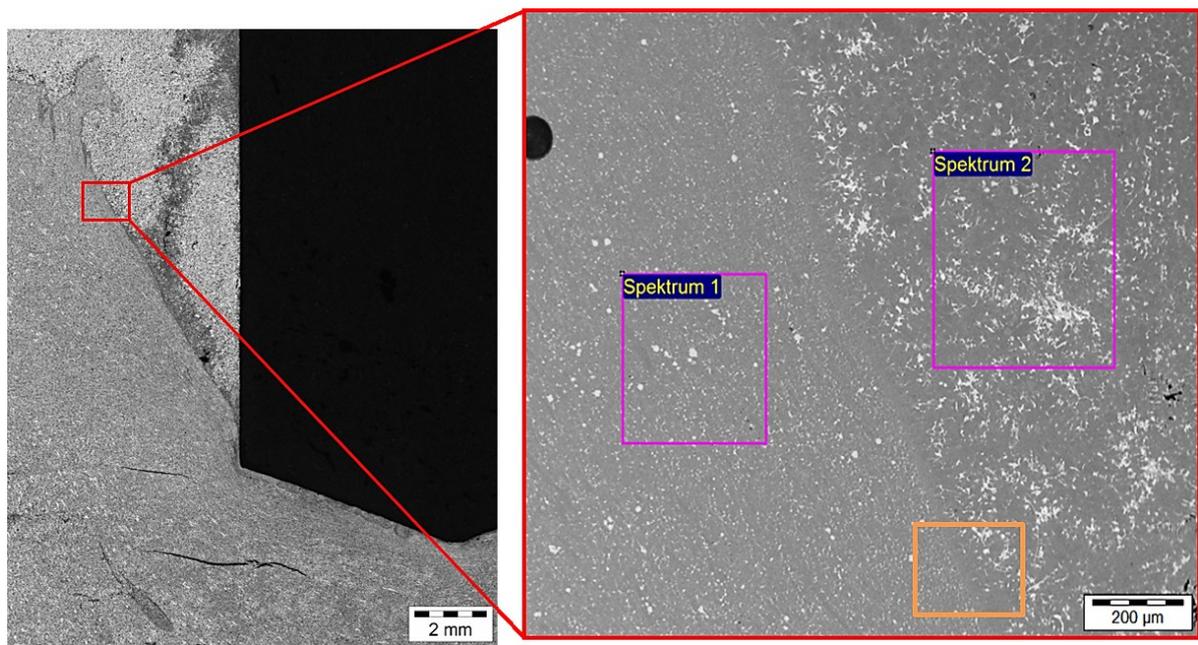


Abbildung 4-18: Links: LM, Probe 5-SP1, Übergang zum verformten Bereich (rote Markierung); Rechts: REM-EDX, Analyse Spektrum 1 und Spektrum 2, Flächenanalyse (orange Markierung).

Die Untersuchung des gesqueezezten, des unbeeinflussten Gefüges und des Übergangs erfolgte mittels EDX-Analyse durch ein so genanntes *Mapping*, dargestellt in Abbildung 4-19. In der linken Bildhälfte ist das verformte, in der rechten das unbeeinflusste Gefüge zu sehen. Dabei wurde die charakteristische Röntgenstrahlung der Elemente zur besseren Sichtbarkeit (Si in grün, Cu in rot, Fe in blau) eingefärbt. Es zeigte sich, dass die im BSD-Modus aufgenommenen hellen Stellen im unbeeinflussten kupferreiche und im gesqueezezten Bereich mehrheitlich eisenreiche Phasen, sprich Phasen höherer Dichte, sind.

Entlang des Übergangsbereichs kann eine Art dunkles Band festgestellt werden. Dieser Gefügefehler ist häufig in Druckgussteilen zu finden. In Al-Si-Legierungen tritt dieser Fehler vorrangig in Form von Seigerungen auf. Dieses Seigerungsband kann durch Vorerstarrung am kälteren Squeeze-Pin (im Vergleich zum Formwerkzeug) entstehen und bildet eine Art Schutzschicht (*Speckschicht*). Diese vermischt sich beim Einfahren des Pins mit der restlichen Schmelze zu einem breiartigen, halbflüssigen Material und wird in den zu verdichtenden Bereich gedrückt. Aufgrund dieser Bandseigerung kann eine Scherfläche entstehen, die sich festigkeitsmindernd auf den Bauteilbereich auswirken kann [31].

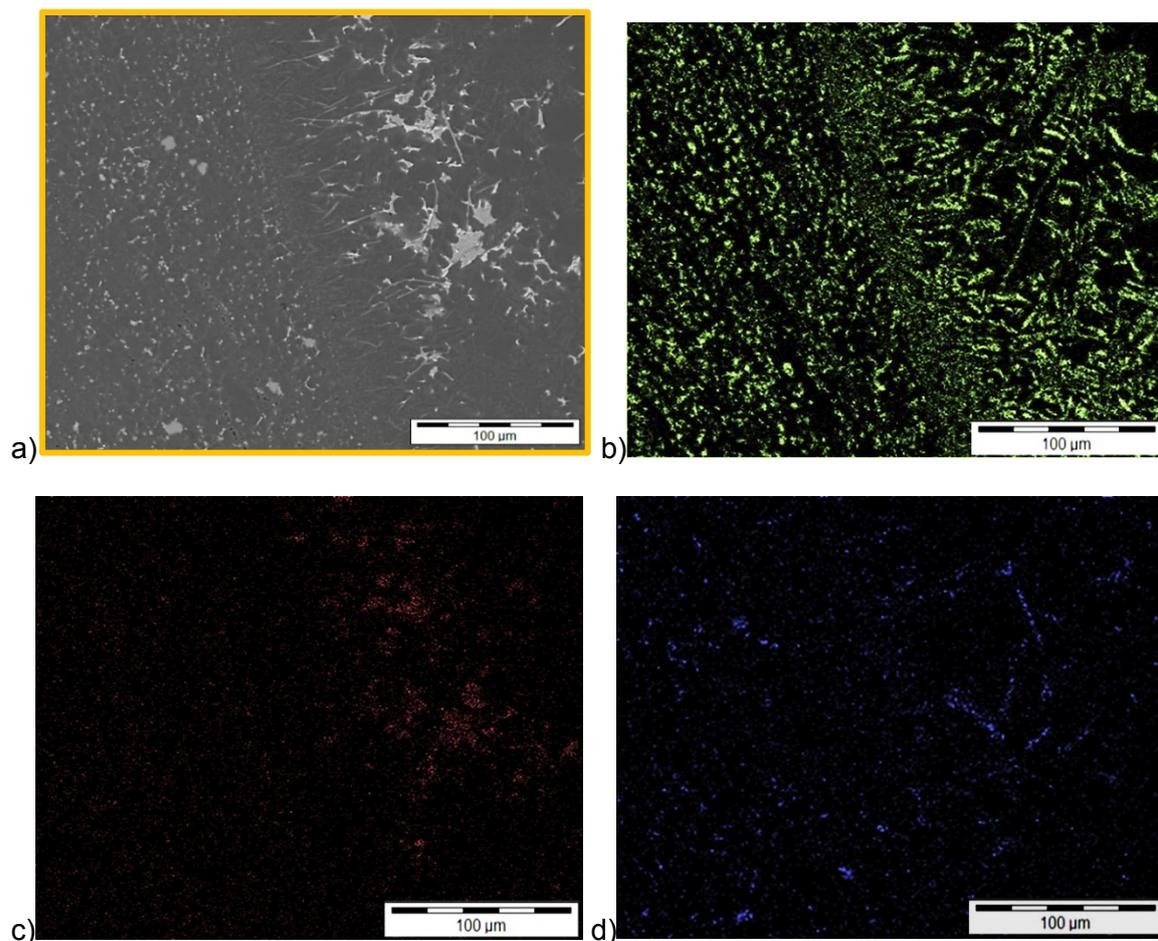


Abbildung 4-19: REM-EDX, Flächenanalyse, Probe 5-SP1, a) Überblick, b) Element Si, c) Cu und d) Fe

In Abbildung 4-19 b) liegt im gesqueezezten Bereich eine feine, gleichmäßige Si-Verteilung vor. Auffallend ist die erhöhte Si-Konzentration, die diese Trennlinie zwischen den beiden Bereichen bildet. Ursache dafür kann eine Verdrängung der eutektischen Al-Si-Phase in Richtung unbeeinflusstes Gefüge während der Verformung sein. Aus Abbildung 4-19 c) geht eine gleichmäßige, feine Verteilung der Cu-Phase im gesqueezezten Bereich hervor bzw. eine typische Ausbildung im unverformten Bereich. Des Weiteren zeigt sich in Abbildung 4-19 d), dass im nicht verformten Bereich vorrangig die Al_5FeSi -Phase (Fe-Nadeln) detektiert wurde, im gesqueezezten hingegen die vordendritische $Al_{15}(Fe,Mn)_3Si_2$ -Phase überwiegt.

Das Ergebnis der Flächenanalysen ist in Tabelle 4-4 ersichtlich. Aus dieser geht hervor, dass im gesqueezezten Gefügebereich ein geringerer Anteil an Si und Cu vorhanden ist. Dies legt den Schluss nahe, dass, verbunden mit der Si- und Cu-Verteilung, Phasen mit niedriger Solidustemperatur, wie Al-Si-Eutektikum und Al-Cu-Phase, aus dem

Squeeze-Bereich verdrängt bzw. aus der Al-Matrix in umliegende Bereiche gepresst wurden. Diese Annahme stützt sich auf die Tatsache, dass der Fe-Gehalt in beiden Bereichen annähernd ident ist und im gesqueezten Bereich ausschließlich die vordendritisch gebildete Fe-Phase detektiert wurde. Es sei vermerkt, dass die EDX-Analyse nur zur Detektion der einzelnen Elemente dient und die absoluten Ergebnisse kritisch zu betrachten sind.

Tabelle 4-4: Ergebnisse der REM-EDX Analyse gesqueezter (Spektrum 1) und unbeeinflusster Bereich (Spektrum 2).

	Si [Massen-%]	Cu [Massen-%]	Fe [Massen-%]	Zn [Massen-%]	Al [Massen-%]
Spektrum 1	15,46	2,26	0,89	0,98	Rest
Spektrum 2	17,61	3,62	0,91	1,23	Rest

Abschließend zu den Untersuchungen der Fa. TCG Unitech, Kirchdorf, ist festzuhalten, dass der Squeeze-Vorgang nicht allein für die Qualität des Gefügebereichs ausschlaggebend ist, sondern auch andere Parameter des Gießablaufs in das Ergebnis einfließen, die jedoch für die Untersuchungen hier nicht reproduzierbar bzw. zugänglich waren. Dieser Umstand unterstreicht die Bedeutung eines Prototyp-Druckgusswerkzeuges unter reproduzierbaren Rahmenbedingungen.

4.2 Getriebegehäuse Fa. ADG

Die Auflistung der firmeninternen Sichtprüfungen beinhaltet Daten von insgesamt 145 Proben und umfasst den Gefügestand des zu squeezeenden Bereichs und die Einfahrtiefe des Squeeze-Pins. Die Beurteilung der Gefügebearbeitung erfolgte nach folgendem Schema: 1 für Bauteil in Ordnung (i.O.), 2 für akzeptabel und 3 für nicht in Ordnung (nicht i.O.). Bei der Einfahrtiefe galt es einen Sollwert von 10 mm mit einer Toleranz von +/- 2 mm einzuhalten. Ein Auszug der erhaltenen Daten ist in Tabelle 4-5 zu sehen.

Tabelle 4-5: Auszug von Daten der visuellen Gefügebearbeitung und Einfahrtiefe.

Datum	Uhrzeit	Nest 1		Nest 2	
		Gefüge	Einfahrtiefe [mm]	Gefüge	Einfahrtiefe [mm]
19.04.	10:20	3	10,1	3	10,2
19.04.	12:55	1	10,1	2	10,1
20.04.	09:20	3	7,9	3	9,2
20.04.	14:15	2	8,7	2	9,1
21.04.	08:40	1	9,4	1	8,8
22.04.	09:25	1	11,1	2	9,4

Nach Auswertung der Daten und Erstellen eines Diagramms, in dem die Einfahrtiefe mit Standardabweichung über Qualität aufgetragen ist (siehe Abbildung 4-20), zeigt sich folgender Zusammenhang. Ein kürzerer Einfahrtiefe des Squeeze-Pins bringt eine sinkende Qualität der Gefügeeigenschaften mit sich. Die Standardabweichung zeigt jedoch eine starke Streuung, speziell bei Werten mit schlechter Gefügebearbeitung. Dabei ist zu beachten, dass trotz geeigneter Einfahrtiefe das Gefüge ungenügend ist (Poren, Risse) war, d. h. nicht den Lieferspezifikationen entspricht, bzw. auch der umgekehrte Fall (inadäquate Einfahrtiefe, geringes Fehleraufkommen) eintrat.

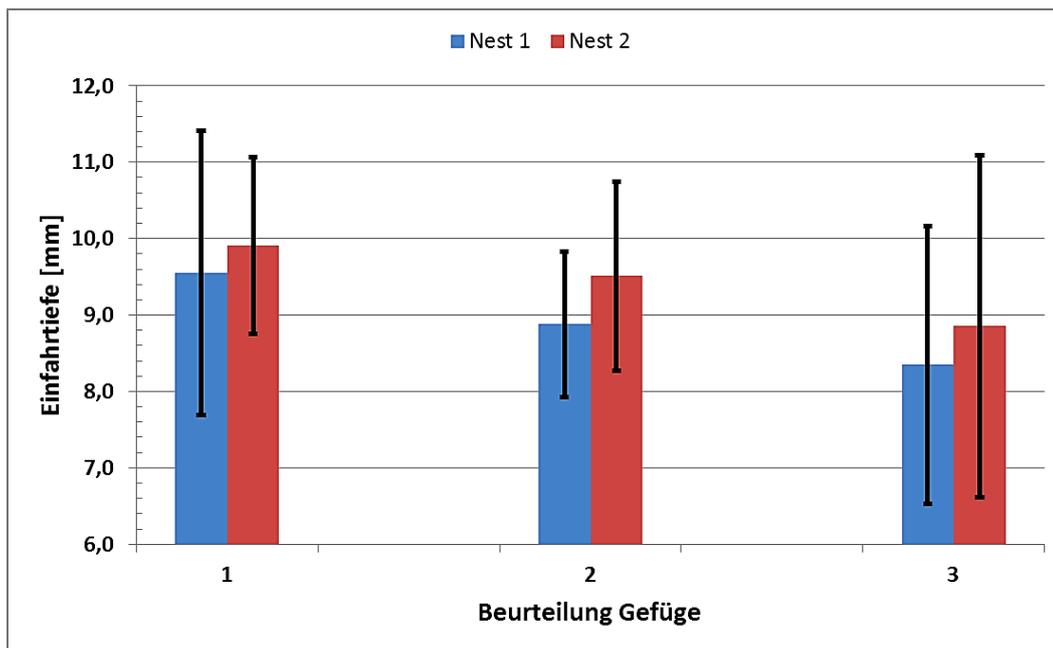


Abbildung 4-20: Zusammenhang Gefügebeurteilung (1: i.O., 2: akzeptabel, 3: nicht i.O.) und Einfahrtiefe mit Standardabweichung.

Um diese Streuung der Einfahrtiefe und die Gefügebeschaffenheit, aber auch die Anzahl der Proben besser in das Ergebnis miteinfließen zu lassen, erfolgte eine Auswertung nach Bereichen. Die Einfahrtiefe wurde in vier Blöcke (< 8, 8 – 10, 10 – 12 und > 12 mm) eingeteilt und die jeweils zugehörigen Ergebnisse der visuellen Gefügebeurteilung in Prozent pro Block eingetragen. Die Ordinate wurden grob in drei Bereiche geteilt; 1 (grün) über 75 %, 2 (gelb) von 50 bis 75 % und 3 (rot) unter 50 %. Das Ergebnis der Auswertung dieser Methode von Nest 1 ist grafisch in Abbildung 4-21 dargestellt und kann wie folgt interpretiert werden. Es ist nun deutlicher zu sehen, dass mit steigender Einfahrtiefe das Gefüge kontinuierlich besser wird. Bei Einfahrtiefen des Squeeze-Pins unter 8 mm liegt eine Wahrscheinlichkeit von ca. 50 % vor, dass der gesqueezezte Bereich in Ordnung ist bzw. gesamtheitlich gesehen, dieser ein unzureichendes Ergebnis liefert. Bei Einfahrtiefen zwischen 8 und 10 mm wird bereits deutlich, dass sich die Anzahl der Ausschussteile verringert. Mit einem Anteil von zwei Drittel an Gutteilen kann Bereich 2 (gelb hinterlegt) als Übergangsbereich, zwischen Ausschuss und Gutteil, bezeichnet werden. Ab einem Einfahrweg des Squeezers > 10 mm kann nach werksseitiger Beurteilung mit mindestens 80%iger Wahrscheinlichkeit gerechnet werden, dass der Gefügebereich den Anforderungen entspricht. Somit kann bei gegebenen Sollwerten des Einfahrweges inkl. Toleranz (10 ± 2 mm) mit einem passablen Ergebnis gerechnet werden.

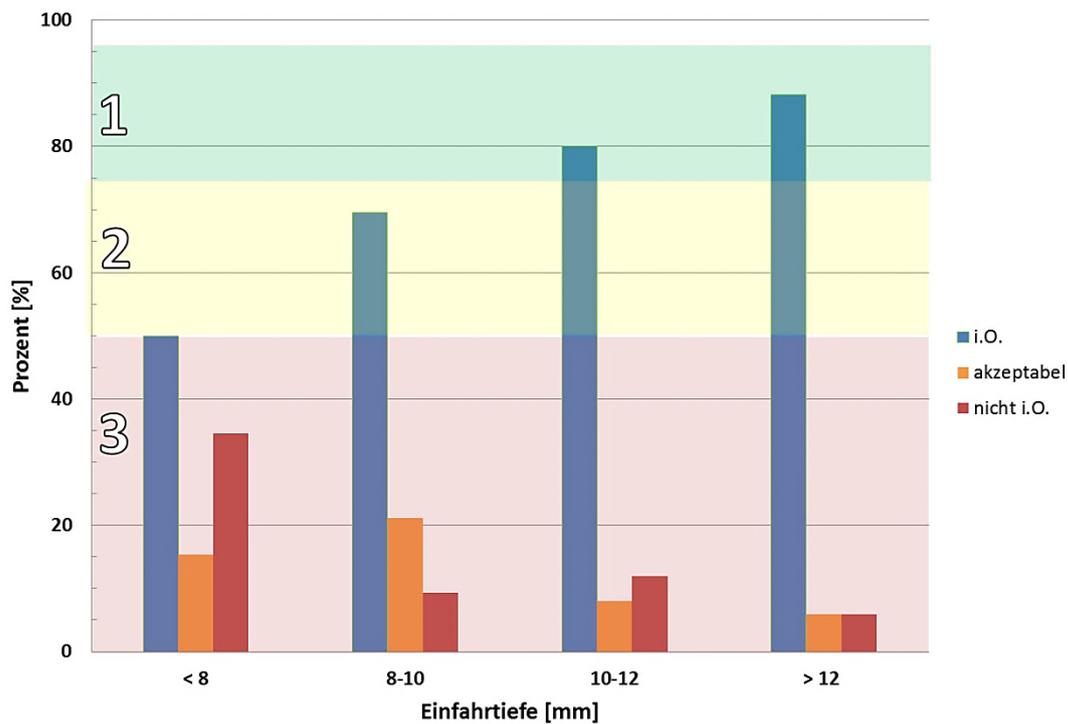


Abbildung 4-21: Zusammenhang zwischen Einfahrtiefe und Qualität der Squeeze-Bereiche von Nest 1.

Das Ergebnis der visuellen Auswertung von Nest 2 ist grafisch in Abbildung 4-22 zu sehen. Generell kann gesagt werden, dass die Squeeze-Bereiche von Nest 2 ein schlechteres Ergebnis im Vergleich zu Nest 1 aufwiesen. Mit steigender Einfahrtiefe ist zwar ein Trend in Richtung besseres Squeeze-Ergebnis erkennbar, jedoch liegt der beste Wert im günstigsten Fall nur knapp über der 50 % Marke. Bei Einfahrtiefen über 12 mm nimmt die Anzahl der Gutteile jedoch wieder ab. Ein analoger Trend wurde bereits in der vorherigen Untersuchung (siehe Kap. 4.1.2) verzeichnet.

Grund dafür könnten abweichende Parametereinstellungen im zweiten Nest, wie eine Verzögerung des Einfahrzeitpunktes oder ungleicher Squeeze-Druck, sein. Eine inhomogene Temperaturverteilung in der Druckgussform bzw. die Lage des Squeeze-Bereichs im Formenbild könnten weitere Ursachen für ein stärkeres Lunkern sein. Abhilfe könnte hier ein Ersetzen der Squeeze-Einrichtung durch gekühlte Kernstifte schaffen.

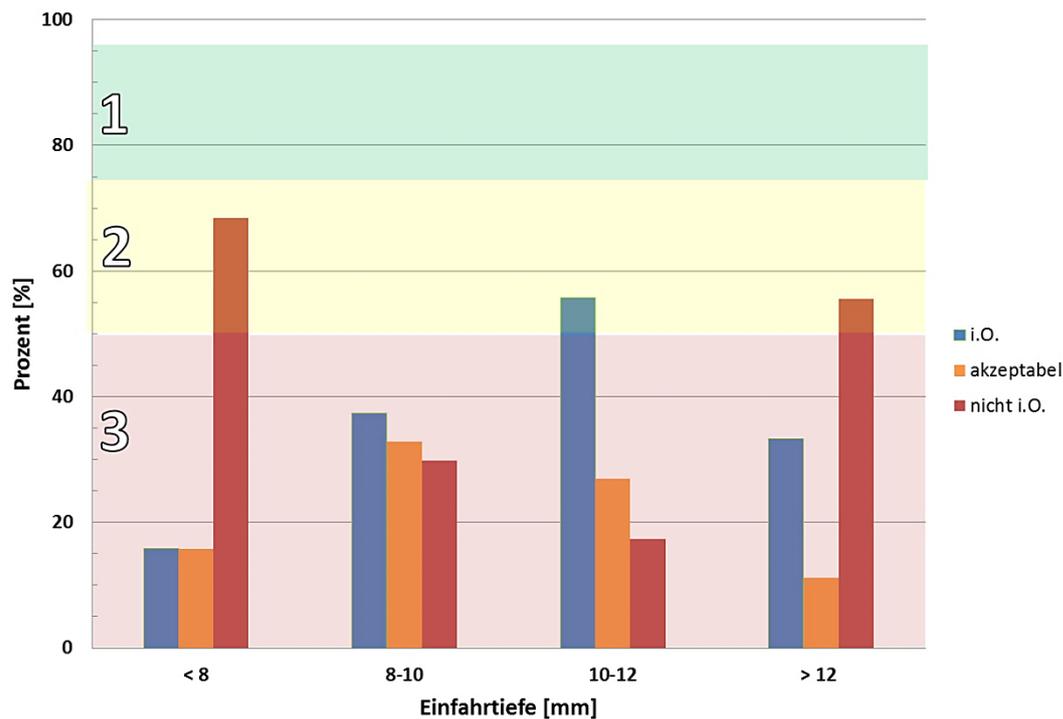


Abbildung 4-22: Zusammenhang zwischen Einfahrtiefe und Qualität der Squeeze-Bereiche von Nest 2.

Abschließend zu den Auswertungen ist festzuhalten, dass diese Ergebnisse nur auf Messungen der Einfahrtiefe beruhen und weitere Parameter, wie z. B. Druck, Zeit oder Geschwindigkeit, nicht erfasst bzw. berücksichtigt wurden. Daher ist diesem Ergebnis nur eine beschränkte Aussagekraft zuzuschreiben.

4.2.1 Computertomografie

In Abbildung 4-23 ist ein 3D-Modell von GT1 mit Porositätsmapping zu sehen. Es ist massive Porosität im Squeeze-Bereich, aufgrund fehlender Nachverdichtung, festzustellen. Die Auswertung von GT1 ergab ein Gesamtdefektvolumen von 0,26 %, was einen hohen Wert darstellt. Aus bereits genannten Gründen (siehe Kapitel 4.1.1), ist dieses Ergebnis nur als Richtwert zu sehen.

Ein Schichtbild des Squeeze-Reservoirs und -bereiches (Schnitt A-A) von GT 1 aus dem Fast-Scan ist in Abbildung 4-24 zu sehen. Dieses verdeutlicht das extrem ungünstige Lunkerverhalten im dickwandigen Bereich des Gussteils aufgrund des fehlenden Squeezens.

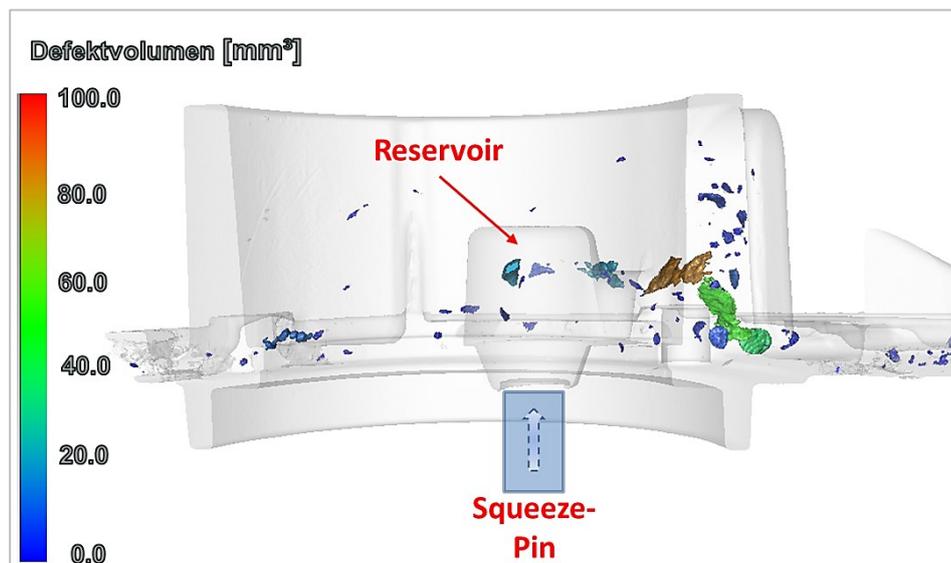


Abbildung 4-23: CT, GT 1.1, 3D-Modell mit Porositätsmapping.

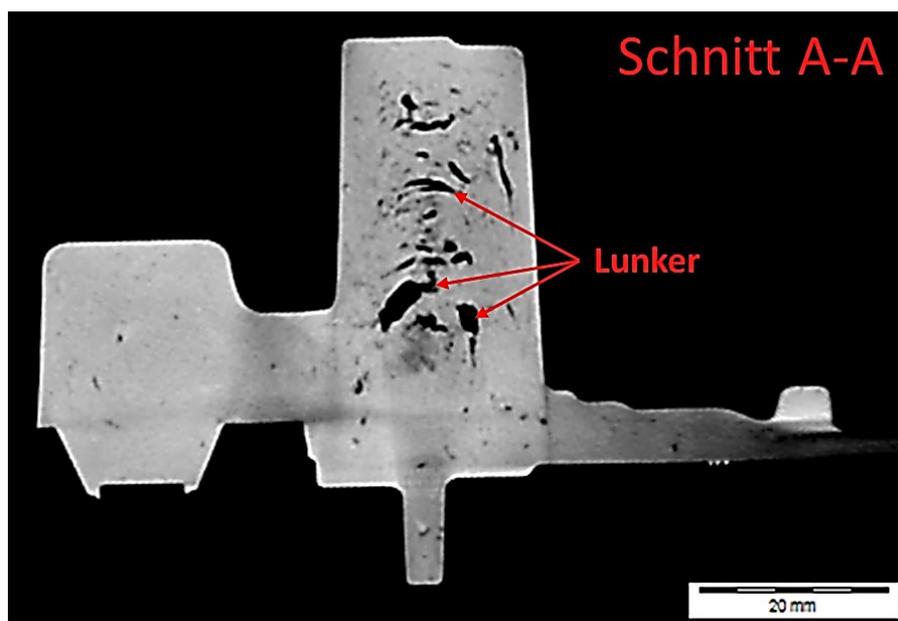


Abbildung 4-24: CT, GT 1.2, Schichtbild von Reservoir und Bauteil (Schnitt A-A)

Abbildung 4-25 zeigt einen Vergleich zwischen GT 1 (links im Bild) und GT 2 (rechts im Bild). In dieser ist der Einfluss des Squeezens im dickwandigen Bereich eindeutig zu sehen. Es ist jedoch festzuhalten, dass aufgrund der statistischen Variationen (z. B. Pressrestlänge, Dosierungsschwankungen $\leq 25\%$) im Druckguss die Vergleichbarkeit dieser beiden Gussteile beeinträchtigt sein könnte.

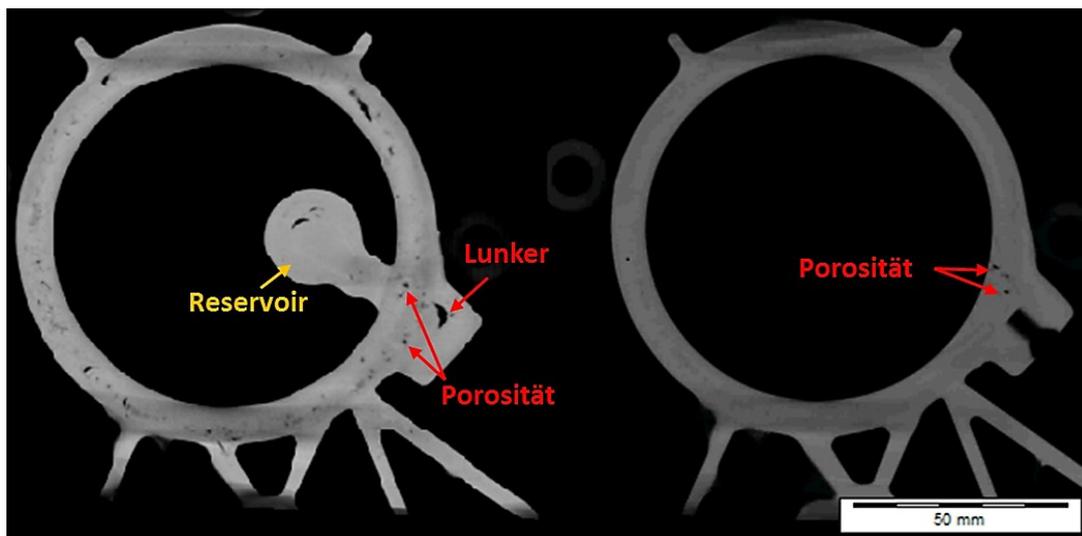


Abbildung 4-25: CT, GT 1 (links) GT 2 (rechts), Vergleich nicht gesqueezelt und gesqueezelt (nachbearbeitet).

Dieser Vergleich zwischen GT1 und GT2 ist jedoch kritisch zu betrachten, da GT2 bereits einer Nach- bzw. Endbearbeitung unterzogen wurde, wodurch der gesqueezelte Bereich weitgehend entfernt wurde. Des Weiteren war die Auflösung der CT-Aufnahme von GT 2 zu gering, wodurch kein schwammartiges (aufgelockertes) Gefüge bzw. keine Porosität detektierbar war. Ein Porositätsmapping hätte dadurch ein nahezu fehlerfreies Ergebnis geliefert. Somit wurde der Schwerpunkt in metallografische Untersuchungen der erhaltenen Squeeze-Reservoir Abschnitte gelegt.

Ein 3D-Modell mit Porositätsmapping von GT 3 ist in Abbildung 4-26 dargestellt. Durch den Einsatz gekühlter Kernstifte, anstelle einer Squeeze-Einrichtung, zeigte sich ein ähnliches Bild bei Häufigkeit und Verteilung der Porosität. Die Messung ergab eine vergleichsweise geringe Porosität im definierten Bereich.

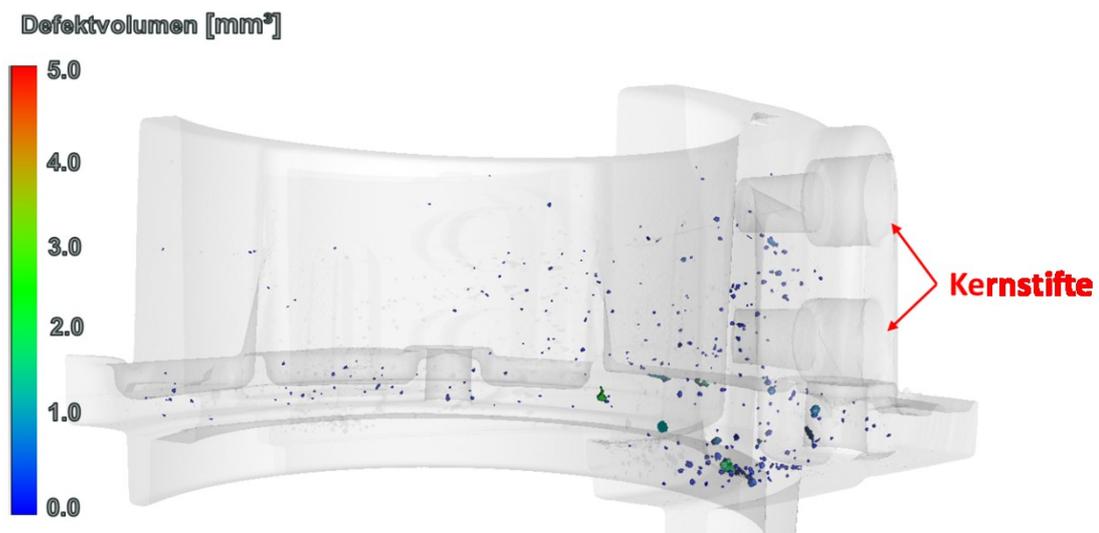


Abbildung 4-26: CT, GT3, 3D-Modell mit Porositätsmapping.

4.2.2 Lichtmikroskopie

Auf metallografische Untersuchungen von GT1 wurde aufgrund der, bereits in der CT detektierten, massiven Lunker und Porosität verzichtet, da diese keine weiteren Erkenntnisse geliefert hätten.

Abbildung 4-27 zeigt die Schliifprobe des Squeeze-Reservoirs von GT2. In dieser ist deutlich das verdrängte Material, in Richtung Bauteil, gekennzeichnet durch die Fließlinien, erkennbar. Aufgrund der Nachverdichtung kam es zu Aufbrüchen und groben Materialtrennungen unter dem Squeeze-Pin. Grund dafür könnte ein zu spät gestarteter Squeeze-Vorgang oder eine Pinform bedingte ungünstige Spannungsverteilung im Reservoir sein. Eine Veränderung der Geometrie des Squeeze-Pins, z. B. ein abgeschrägter Pin (keilförmig), würde eventuell eine optimierte Nachverdichtung bewirken.

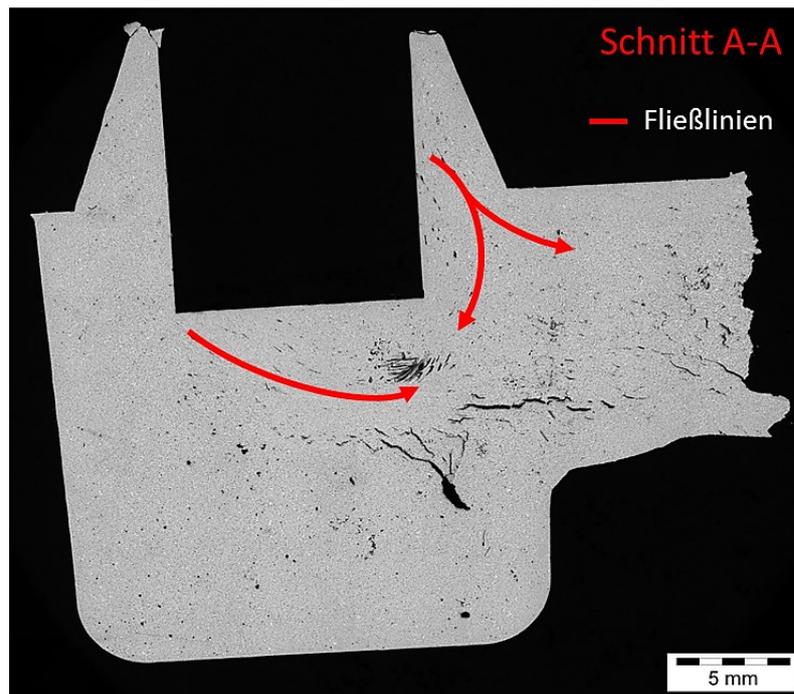


Abbildung 4-27: LM, Squeeze-Reservoir mit Kennzeichnung der Verformungsrichtung.

Für die Bezeichnung der Proben wurde eine fortlaufende Nummerierung gewählt, bei welcher die zweite Zahl jeweils für Nest 1 oder 2 steht.

Abbildung 4-28 zeigt den Schliff eines für i.O. befundenen Squeeze-Bereichs von GT 2 Probe 1.1. Im Schliffbild von Probe 1.1 zeigt sich, dass Porositäten zum Teil verdichtet (gelb umrandeter Bereich), jedoch mehrheitlich in umliegende Bereiche verschoben wurden bzw. der Wirkungsbereich des Squeezers zu gering war. Eine Porositätsmessung ergab 0,5 %, welches einen prozessbedingten, typischen Wert darstellt.

Das verdichtete Gefüge sowie der Übergangsbereich wurden genauer untersucht (siehe Detail 1 bzw. Detail 2).

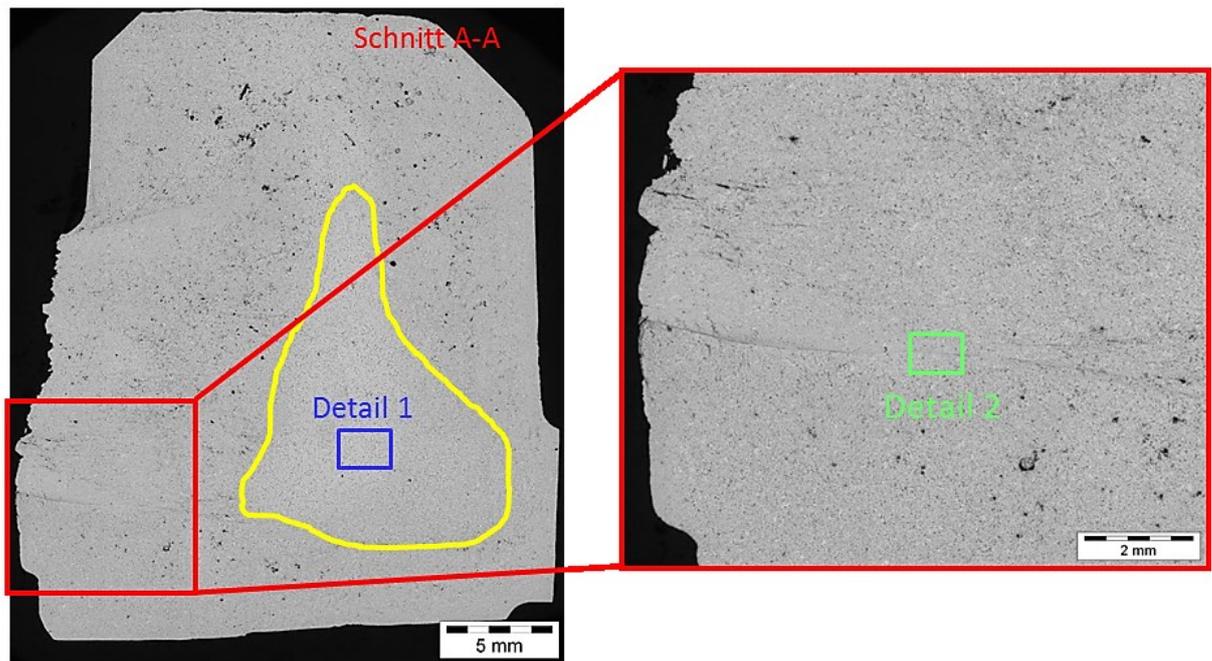


Abbildung 4-28: LM, GT2 Probe 1.1, Überblick Squeeze-Bereich, verdichteter Bereich (gelb) mit Position Detail 1 (links), vergrößerter Bereich mit Position Detail 2 (rechts).

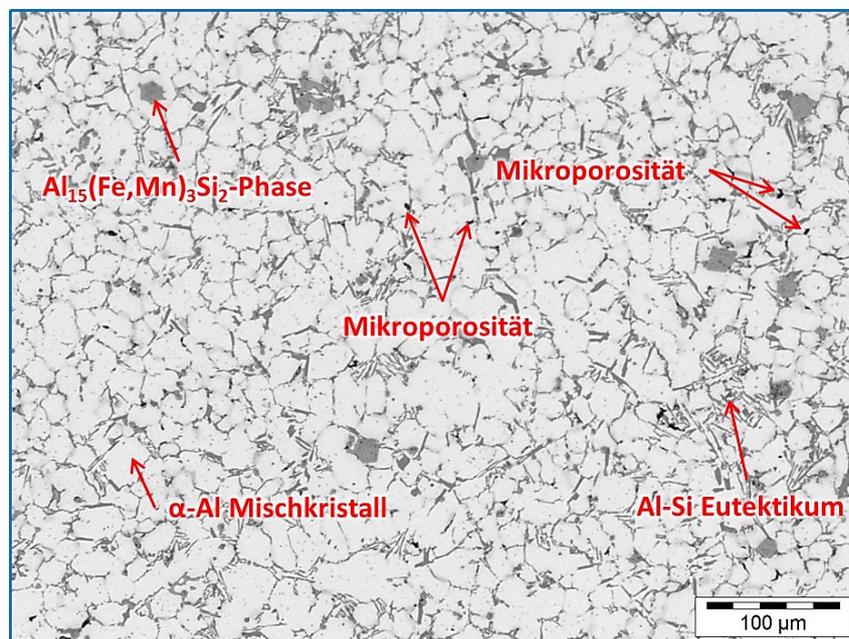


Abbildung 4-29: LM, GT2 Probe 1.1, Detail 1, vergrößerte Ansicht des verdichteten Bereichs mit Gefügebeschreibung.

In Abbildung 4-29 ist eine vergrößerte Aufnahme von Detail 1 zu sehen. Die Gefügeausbildung ist typisch für eine unveredelte Al226D-Legierung. Primäre

Bestandteile sind α -Al Mischkristalle (weiß), das dazwischen liegende, körnige Al-Si-Eutektikum (grau) und die vordendritisch gebildete, polygonal geformte $Al_{15}(Fe,Mn)_3Si_2$ -Phase. An den Korngrenzen wurde Mikroporosität festgestellt, deren Ausmaß als verschwindend klein angesehen werden kann. Der verdichtete Bereich kann als dichtgespeist angesehen werden.

Detail 2, dargestellt in Abbildung 4-30, zeigt den Übergangsbereich von unbeeinflusstem Gefüge und dem Verdrängungsbereich. Das Gefüge ist aufgrund der starken Verformung zusammengepresst (obere Bildhälfte) und wirkt feiner. Der Anteil an eutektischer Phase scheint im Übergangsbereich erhöht zu sein, was sich, durch diese Gefügeheterogenität, festigkeitsmindernd auf diesen Bereich auswirken kann. Zwischen den beiden Bereichen ist zwar ein stofflicher Verbund gegeben, dieser ist aber durch eine feine Porenkette entlang des Übergangs geschwächt, wodurch mit einer weiteren Reduzierung der Festigkeitseigenschaften gerechnet werden muss.

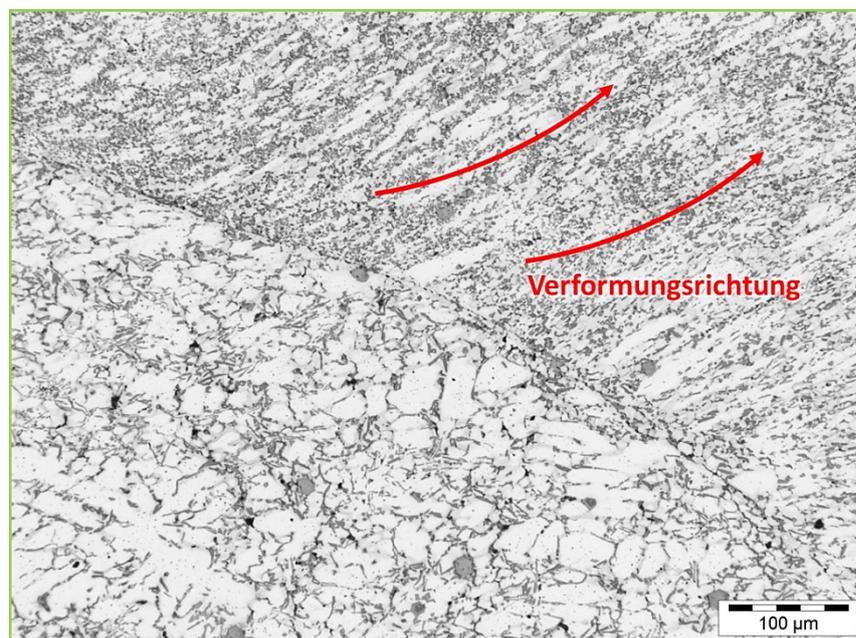


Abbildung 4-30: LM, GT2 Probe 1.1, Detail 2, vergrößerte Ansicht, Übergangsbereich unbeeinflusstes und verformtes Gefüge mit eingezeichneter Verformungsrichtung.

In Abbildung 4-31 ist der Squeeze-Bereich von GT2 Probe 1.2 zu sehen, welcher nach der Datensatzauswertung der Fa. ADG, bei geeignetem Einfahrweg, für nicht i. O.

befunden wurde. Das verdichtete Gefüge nimmt in etwa den gleichen Bereich in Größe und Lage wie in Probe 1.1 ein. Außerhalb dieses Bereichs tritt verstärkt Porosität bzw. Lunker auf, wodurch das Gussteil, bedingt durch die erhebliche Schädigung des Gefüges (siehe rot markierter Bereich), als Ausschussteil zu bewerten ist.

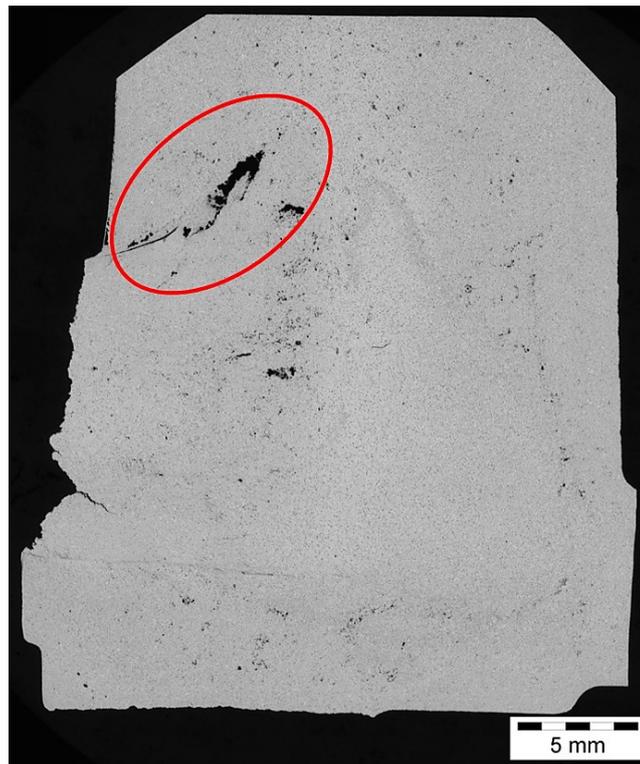


Abbildung 4-31: LM, GT2 Probe 1.2, Überblick Squeeze-Bereich mit Lunker (rot markiert).

Der Vergleich GT2 Probe 2.1 und Probe 2.2 in Abbildung 4-32 zeigt einmal mehr, dass der Squeeze-Bereich des zweiten Nests trotz geeigneter Einfahrtiefe, die auffallend schlechtere Gefügebeschaffenheit, mit Materialtrennung im Verformungsbereich und aufgelockertem Gefüge außerhalb des Verdrängungsbereichs, aufweist. Die sich in der Datensatzauswertung der Sichtprüfung von Fa. ADG abzeichnende Tendenz der schlechteren Gefügebeschaffenheit von Nest 2 hat sich in den metallografischen Untersuchungen weitestgehend bestätigt.

In Abbildung 4-33 ist die vergrößerte Aufnahme von Detail 3 dargestellt. Der Verlauf bzw. die gegengleiche Oberfläche der Rissfronten abwechselnd glatt/reliefartig deuten auf einen Scherriss hin. Diese durch Scherspannungen induzierte, plastische Verformung verursacht ein Abgleiten des Gefüges. Ursache dafür ist vermutlich ein zu

hoher Squeeze-Druck bzw. eine bereits zu weit fortgeschrittene Erstarrung des Materials.

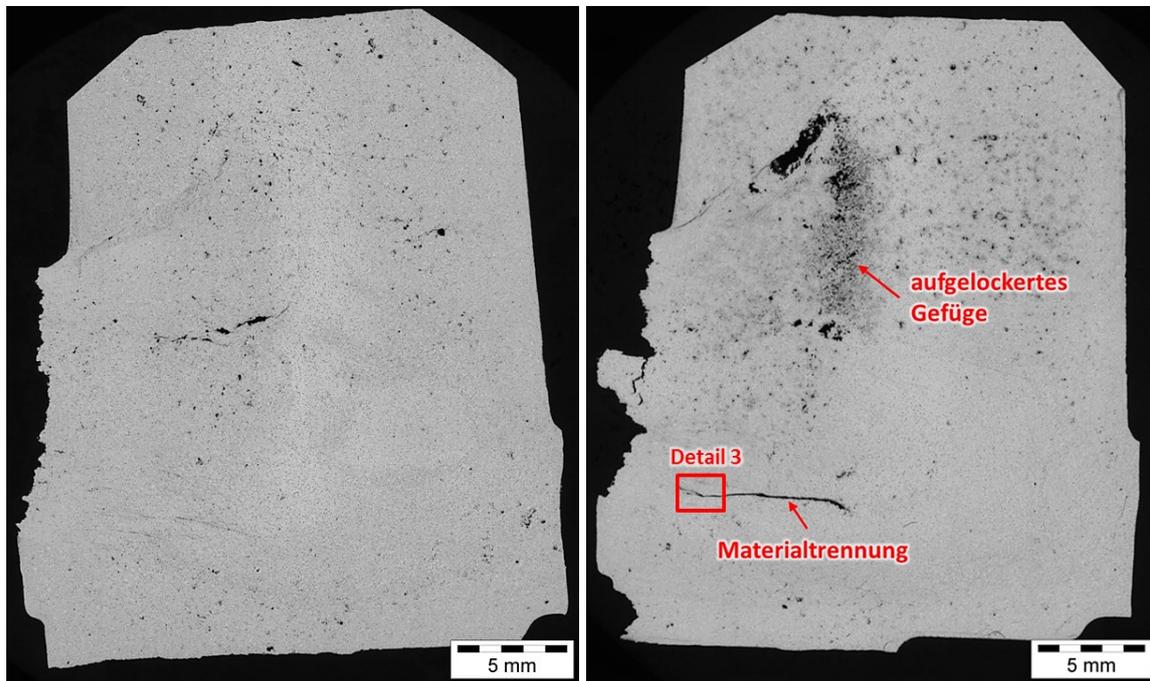


Abbildung 4-32: LM, GT2 Probe 2.1 (links) und Probe 2.2 (rechts), Übersicht Squeeze-Bereiche, Fehlerbeschreibung und Position Detail 3 in Probe 2.2 (rechts).

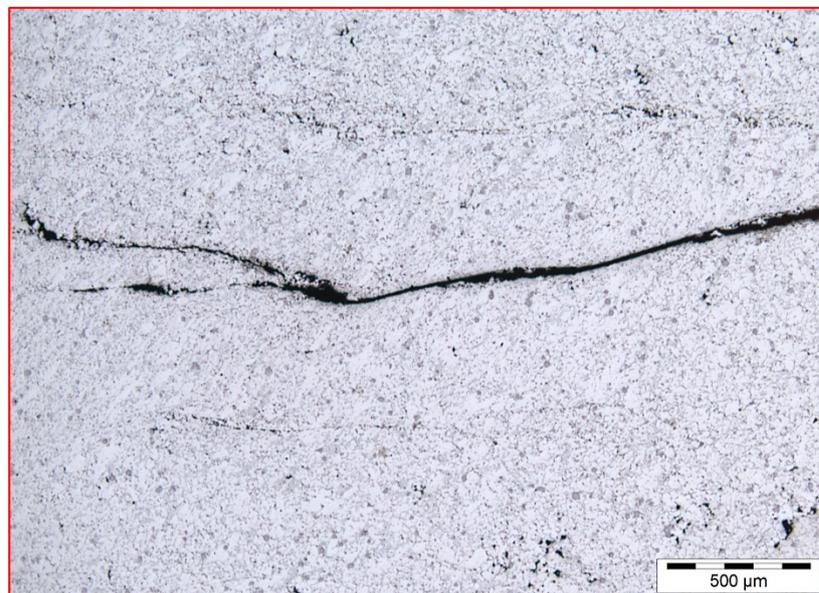


Abbildung 4-33: LM, GT2 Probe 2.2, Detail 3, vergrößerte Ansicht.

Bei Einfahrwegen über 12 mm wurden trotz des höheren Verdichtungshubs vermehrt Materialtrennungen festgestellt. Ursache dafür könnte ein Aufreißen des Gefüges beim

Ausfahren des Squeezers, aufgrund der größeren Reibungsfläche zwischen Squeeze-Pin und –Reservoir, sein.

Ein Schlifffbild von GT3 Probe 1.1 (Schnitt 1) mit schematisch eingezeichnetem Kernstift und Schlifffposition (kleines Bild), ist in Abbildung 4-34 dargestellt. Darin ist zum Teil gesteigerte Porosität, speziell zwischen den Kernstiften, zu vermerken. Durch die Modifikation des Gussteils im definierten Bereich (vorher Squeeze-Bereich) hat sich keine merkliche Verbesserung im Porositätsaufkommen gezeigt. Auch bei GT3 wurde festgestellt, dass Nest 2 eine höhere Porosität aufweist. Die Randzone entlang der Kontur der Kernstifte weist ein sehr feines und porenfreies Gefüge, eine Speckschicht (siehe Kap. 2.5), auf. Im Vergleich zum gesqueezten Gussteil ist, aufgrund der Speckschicht und einer geringeren Nachbearbeitung in jenem Bereich, mehr Porosität im Gussteil zulässig.

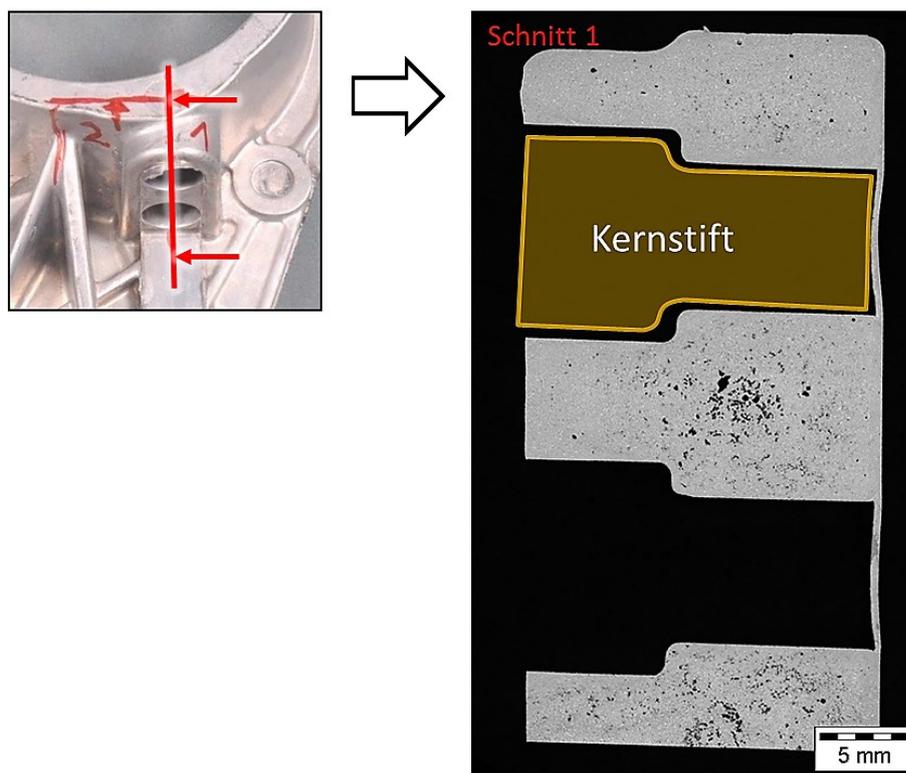


Abbildung 4-34: LM, GT3 Probe 1.1, Überblick gekühlter Bereich (Schnitt 1) mit schematisch eingezeichnetem Kernstift, Schliffflage (Bild links).

In Abbildung 4-35 ist das Schlifffbild von GT3 Probe 1.1 (Schnitt 2) mit Schlifffposition (kleines Bild) zu sehen. Auch hier zeigt sich ein typisches Lunkerverhalten, wobei mit steigender Entfernung von den gekühlten Kernstiften (linke Bildhälfte), erhöhte Porosität

zu vermerken ist. Ursache könnte der begrenzte Einfluss bzw. die zu geringe Reichweite der Kernkühlung sein.

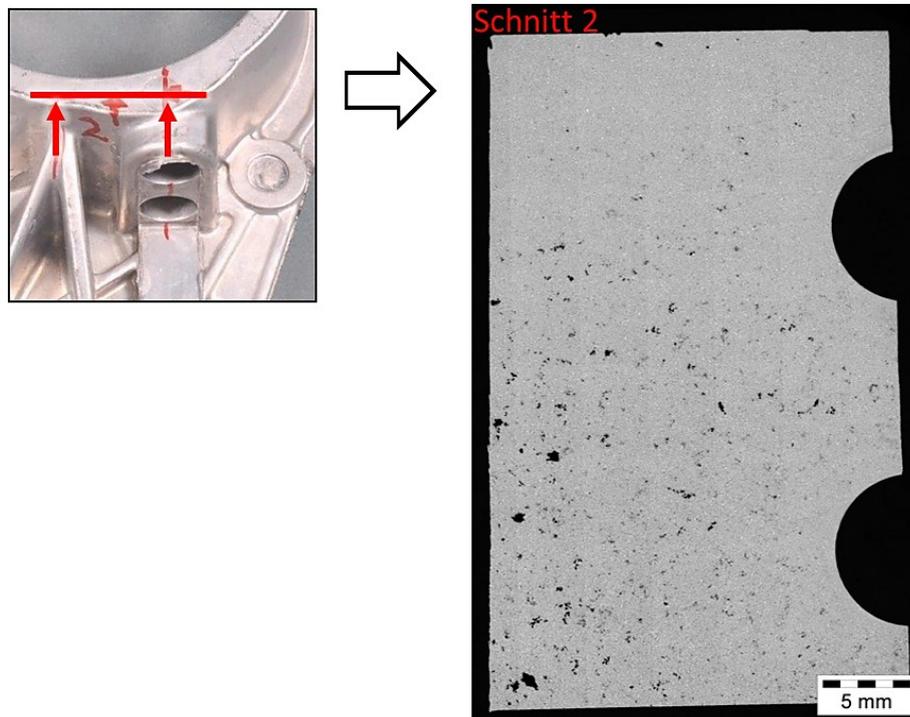


Abbildung 4-35: LM, GT3 Probe 1.1, Überblick gekühlter Bereich (Schnitt 2), Schlifflage (Bild links).

Somit liefert die Variante mit gekühlten Kernstiften (GT3), global gesehen das bessere Ergebnis durch die einfachere Handhabung, verglichen mit der z. T. komplexen Methode des Squeezens (Installation in der Form, Messsensorik, Parametereinstellungen, etc.).

5 Entwicklung eines Druckgieß- Versuchswerkzeuges

5.1 Konzeption

Basierend auf den Ergebnissen aus den industriellen Untersuchungen, können für die Auslegung des Versuchswerkzeuges folgende Punkte abgeleitet werden:

- Das Werkzeug soll derart konstruiert sein, dass sich an definierter Stelle der Probe ein Hot-Spot ausbilden kann. Das vom Squeeze-Pin zu verdrängende Volumen muss solch ein Ausmaß haben, dass der Hot-Spot theoretisch vollständig nachverdichtet werden könnte.
- Aufgrund unterschiedlicher Squeeze-Ergebnisse zwischen direktem und indirektem Nachverdichten, sollte die Möglichkeit bestehen, beide Verfahrensvarianten im Versuchswerkzeug zu testen.
- Der Materialfluss im Bereich des Squeeze-Pins deutet darauf hin, dass Stempel- und Reservoirgeometrie Einfluss auf das Resultat der Nachverdichtung haben. Somit sollten verschiedene Kombinationen von Stempel- und Reservoirgeometrie realisierbar sein.
- Die Parameter Verdichtungsdruck, Verdichtungshub, Einfahrtgeschwindigkeit und Einfahrtverzögerung müssen unabhängig voneinander eingestellt werden können. Außerdem sollte die Messung und Aufzeichnung der Ist-Größen möglich sein.
- Aufgrund einer gewissen Verfahrensstreuung beim Druckgießen, welche den Einfluss des Squeezens beeinträchtigen könnte, sollten mit einem Schuss eine nachverdichtete Probe und eine Referenz abgießbar sein. Ein Werkzeug mit zwei Formnestern ist dafür ideal geeignet.

Unter Beachtung der Vorgaben zur Vermeidung formfüllbedingter Fehler (siehe Kap. 1) und anhand der oben genannten Überlegungen und Anforderungen, wurde ein geeignetes Testwerkzeug entworfen. Abbildung 5-1 und Abbildung 5-2 zeigen schematisch das Konzept des Testwerkzeugs der beweglichen Formhälfte bzw. ein einzelnes Gussteil mit Hot-Spot-Position, unter Einhaltung aller Erfordernisse an das Werkzeug, wie Hot-Spot-Bildung, Reproduzierbarkeit (zwei Nester) und der Möglichkeit lokal, direkt oder indirekt, nachzuverdichten. Die hohe Wandstärke an der Stirnseite des Probenkörpers ergibt sich aus der Forderung nach einer Hot-Spot-Bildung. Die

rotationssymmetrische, zylindrische Form wurde für eine bessere Gießbarkeit und einfachere Ausformbarkeit gewählt. Die Innenkontur des Gussteils wird durch die Kerne bestimmt. Die mittig liegenden Reservoirs für ein indirektes Nachverdichten sind in einem separaten Block gefräst und somit tauschbar. Dies erlaubt die Untersuchung der Auswirkung unterschiedlicher Geometrien des Reservoirs und verschiedener Querschnitte der Anbindung an das Gussteil. Die Position der Squeeze-Einrichtung für die direkte Nachverdichtung ist variabel. Das heißt, dass das Einfahren des Stempels entweder stirnseitig oder seitlich in den Hot-Spot-Bereich erfolgen kann.

Zur Messung und Aufzeichnung der Squeeze-Parameter in Echtzeit bzw. zur Kontrolle der gegenwärtigen Temperatur in den beiden Formnestern, wird das Versuchswerkzeug mit diverser Messsensorik ausgestattet. Für die Erfassung der Eindringtiefe und Aufnahme der Einfahrtgeschwindigkeit des Squeeze-Pins kommt ein induktiver Wegmesssensor zum Einsatz. Zur Ermittlung des anliegenden bzw. zur Überwachung des eingestellten Squeeze-Drucks ist ein Hydraulikdrucksensor in der Squeeze-Einrichtung integriert. Die Bestimmung der Temperaturen in den Formnestern zur Erfassung der Gussteiltemperatur erfolgt über echtzeitgeregelte RTS-Temperatursensoren. Um die Temperaturen der Schmelze beginnend von der Formfüllung bis zur Erstarrung zu verfolgen, werden zwei schnellansprechende Sensoren zur Messung der Schmelzefront verwendet.

Des Weiteren ist eine Möglichkeit zur lokalen Kühlung des Hot-Spot-Bereichs, installiert in den Stirnflächen der Kerne, gegeben.

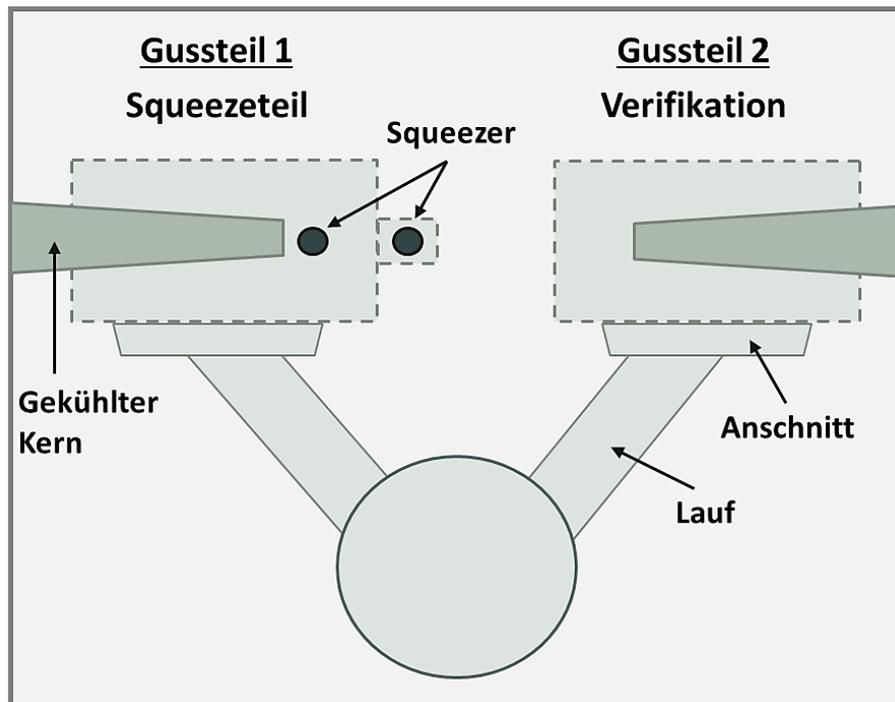


Abbildung 5-1: Schematische Darstellung des Testwerkzeuges mit Kernen und Squeeze-Positionen.

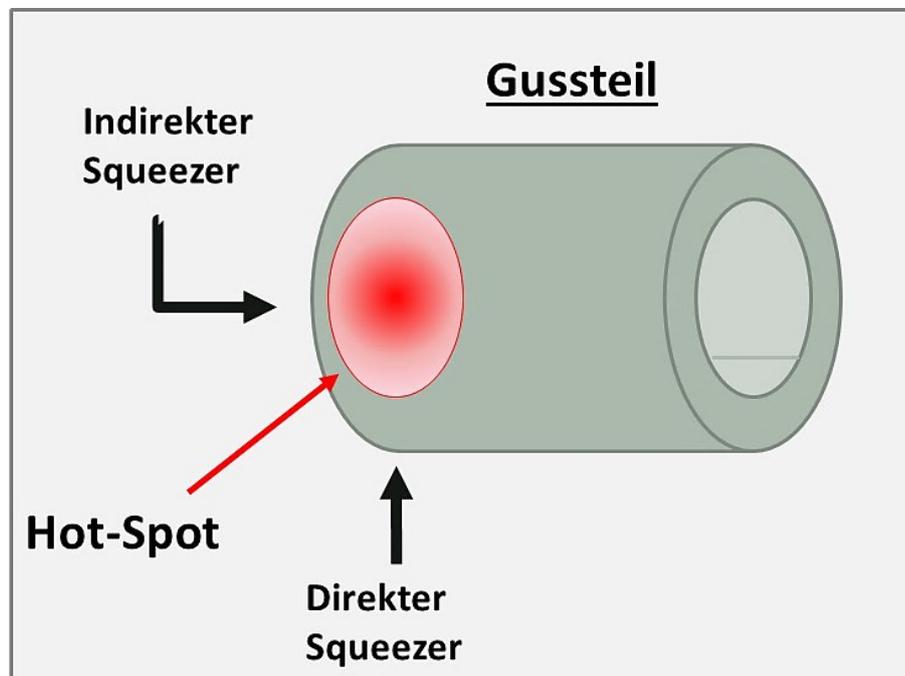


Abbildung 5-2: Schematische Darstellung eines Gussteils mit eingezeichneten Squeeze-Positionen und zu erwartendem Hot-Spot.

Somit ermöglicht das Versuchswerkzeug die Herstellung von Gussteilen im Druckgussprozess, unter Einhaltung aller geforderten Punkte der Konzeption.

Unter diesen Aspekten und den gewonnenen Erkenntnissen wurde ein Testwerkzeug entworfen. Bei der Entwicklung neuer Werkzeuge stellen Formfüllungs- und Erstarrungssimulationen ein wichtiges Instrument dar. Durch eine numerische Simulation kann relativ einfach kontrolliert werden, ob die gewünschte Geometrie eine risikobehaftete Formfüllung aufweist. Durch die Möglichkeit während der Entwicklungsphase entsprechend früh und einfach auf Probleme zu reagieren, können Mehrkosten durch eine nachträgliche Änderung des Werkzeugs stark reduziert werden.

5.2 Version 1

In Abbildung 5-3 ist eine Übersicht des CAD 3D-Modells von Version 1 der Doppelprobe ohne Squeeze-Reservoir, mit Angusssystem und Überläufen (links) bzw. eine vergrößerte Ansicht mit Längsschnitt durch das Gussteil ohne Überlauf (rechts) dargestellt. Sämtliche Zeichnungen der Modelle wurden mit der Software SolidWorks 2012 entworfen.

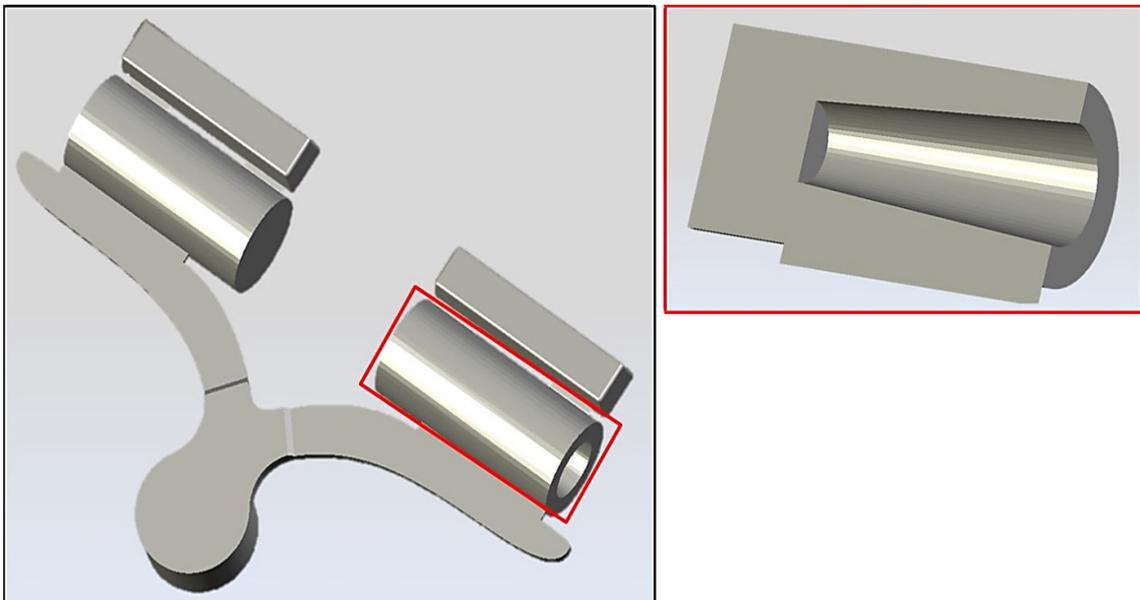


Abbildung 5-3: CAD 3D-Modell, Version 1, links: Geometrie der Doppelprobe; rechts: Längsschnitt durch einen Probenkörper ohne Überlauf.

5.2.1 Ergebnisse der Simulation von Version 1

Die gießtechnische Auslegung des Werkzeuges bzw. die Simulation des Gussteils wurde mit der Software MAGMASoft 5.2 durchgeführt. Mittels einer Gießprozess-Simulation kann der Vorgang einer lokalen Nachverdichtung jedoch nicht berechnet werden bzw. ist es nicht möglich Auswirkungen des Squeezens in das Ergebnis miteinfließen zu lassen. Die Simulation diente somit vorrangig zur Kontrolle der Formfüllung, Erstarrungszeit und Temperaturgradienten, vor allem im Bereich des gewollten Hot-Spots. Aus diesem Grund ist hier das Gussteil vorerst ohne Squeeze-Reservoir ausgeführt.

Abbildung 5-4 zeigt eine Darstellung eines Probenkörpers aus der Erstarrungsberechnung, beim Zeitpunkt von ca. 28 Sekunden mit Position des zuletzt erstarrenden Schmelzbereichs. Wie erwartet, bildet sich in dem dickwandigen Bereich des Gussteils ein Hot-Spot (roter Bereich) aus, womit sich das Konzept des Testwerkzeugs bestätigt hat. Es ist jedoch festzuhalten, dass die Software MAGMASoft bei einem Festphasenanteil von 40 % den Bauteilbereich als erstarrt auffasst und in der Abbildung hellgrau dargestellt wird. Dieser Übergang wird bei ca. 570°C erreicht, obwohl bei diesen Temperaturen durchaus noch die Möglichkeit besteht, dass niedrigschmelzende Phasen, wie Al_2Cu oder Mehrstoffphasen (mit Si, Fe, Zn und Mg), noch schmelzflüssig vorliegen.

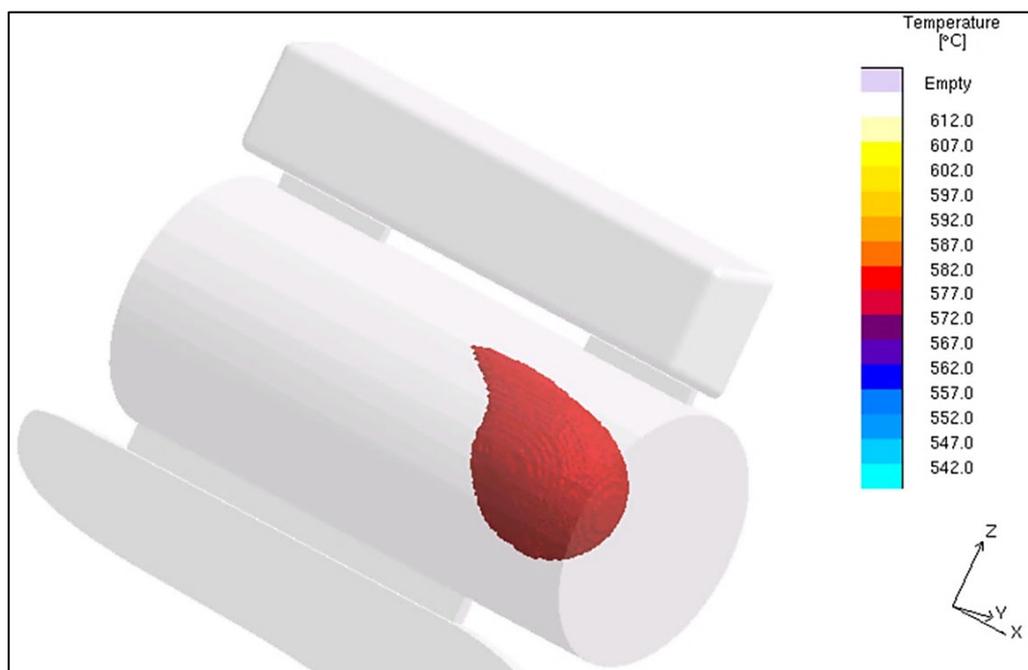


Abbildung 5-4: Simulationsbild Erstarrung, Version 1, Probenkörper mit Position des zuletzt erstarrenden Bereichs (Hot-Spot).

Die geschwungene Form des Laufs soll eine gleichmäßige Füllung des Anschnitts und folglich des Gussteils gewährleisten. Wie sich in der Simulation mithilfe der Verfolgung des Strömungsverlaufs (Fill-Tracer, siehe Abbildung 5-5) zeigte, kommt es allerdings am Ende des Laufs auf beiden Seiten zu starken Verwirbelungen. Dadurch kann möglicherweise Luft in das Gussteil mitgerissen werden, was somit vermehrte Porosität verursacht. Weiters wurde festgestellt, dass die Schmelze nicht, wie beabsichtigt, zuerst den gesamten Querschnitt des Anschnitts ausfüllt, sondern direkt in die Probenform vorausströmt und somit eine ungleichmäßige Formfüllung bewirkt. Abbildung 5-6 zeigt diese Umstände der schlechten Formfüllung des Probenkörpers in einer vergrößerten Ansicht. Auch der Strömungsverlauf zu bzw. in den Überläufen ist nicht optimal, da es zu einer Vorfüllung dieser kommt und diese sich nicht wie angestrebt erst am Ende der Formfüllung füllen. Aufgrund der starken Schmelzebewegung im Angusssystem und der ungleichmäßigen Formfüllung kann es somit zu Gussfehlern im Probenkörper kommen (siehe Kap.2.4.1).

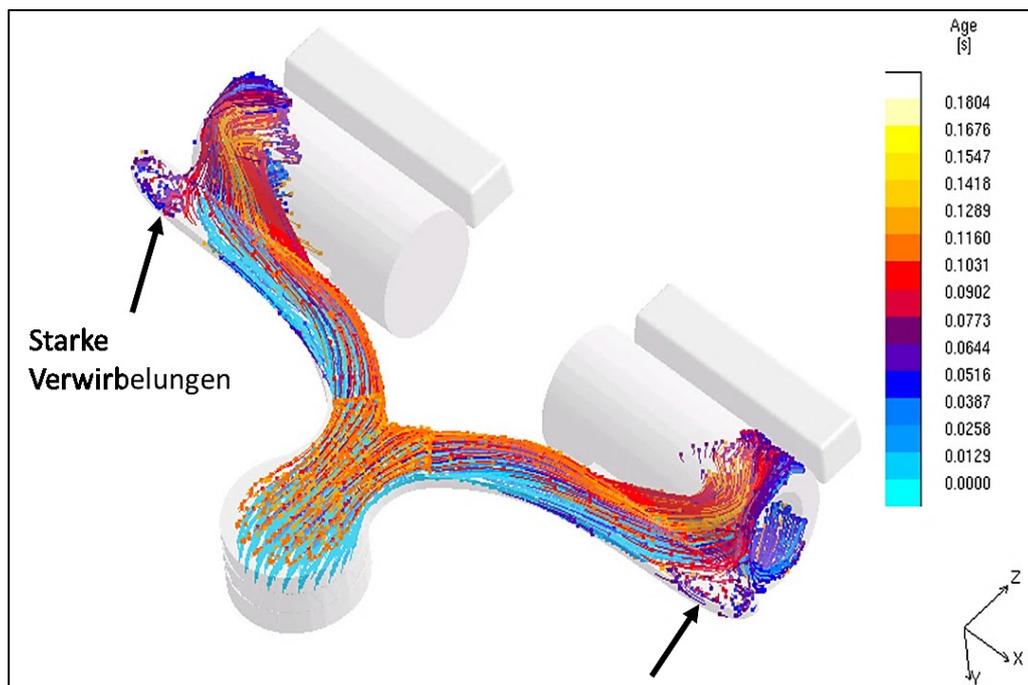


Abbildung 5-5: Simulationsbild Strömungsverlauf (Fill-Tracer), Version 1, gesamter Abguss mit durchgehendem Überlauf.

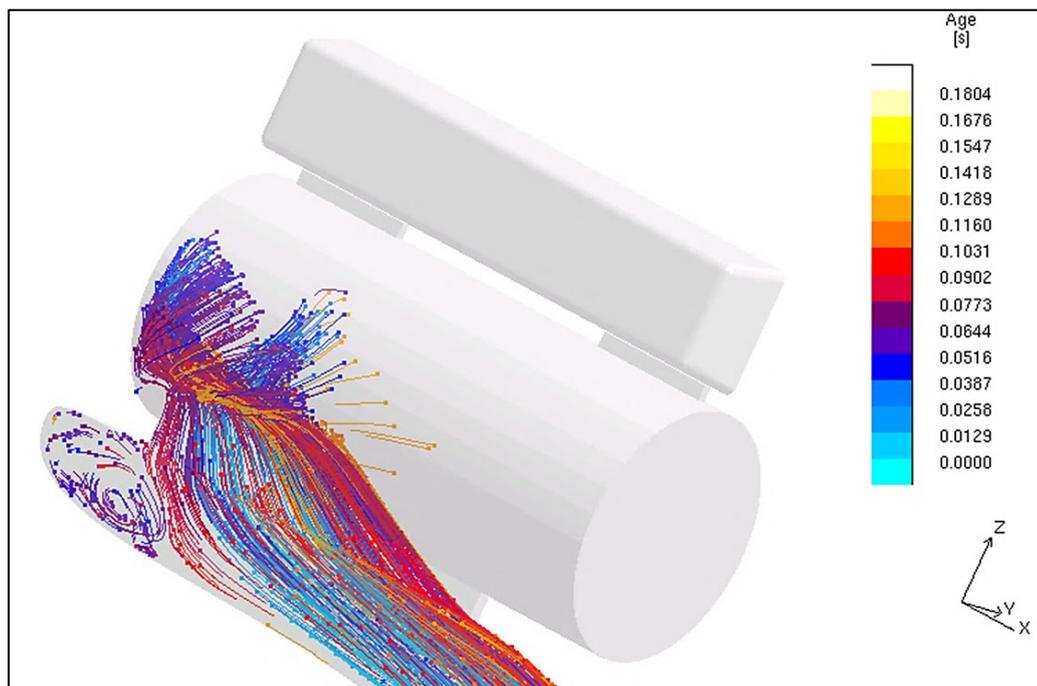


Abbildung 5-6: Simulationsbild Strömungsverlauf (Fill-Tracer), Version 1, vergrößerter Bereich eines Probenkörpers.

Die soeben genannten Aspekte erfordern daher eine Modifikation des Angussystems und der Überläufe.

5.3 Version 2

Die Modifikationen erfolgten am Angussystem und an den Überläufen. Die geschwungene Form des Laufs wurde durch eine geradlinige substituiert und schließt mit der Außenkante des Gussteils ab. Aufgrund des schlechten Ergebnisses der Füllsimulation im durchgehenden Überlauf, wurde dieser durch drei einzelne Überlaufbohlen ersetzt. Die Geometrie des Probenkörpers wurde ebenfalls abgeändert. Die zylindrische Form wurde an der Längsseite des Gussteils parallel zum Anschnitt zur einfacheren Installation und Anwendung der direkten Squeeze-Einrichtung beiderseits abgeflacht. Des Weiteren wurde der Probekörper, ab diesem Entwicklungsschritt, mit einem Squeeze-Reservoir versehen. Die Anbindung mit Reservoir hat die Form einer Halbschale mit aufgesetztem, gefastem Zylinder. Eine CAD 3D-Darstellung von Version 2 ist in Abbildung 5-7 zu sehen.

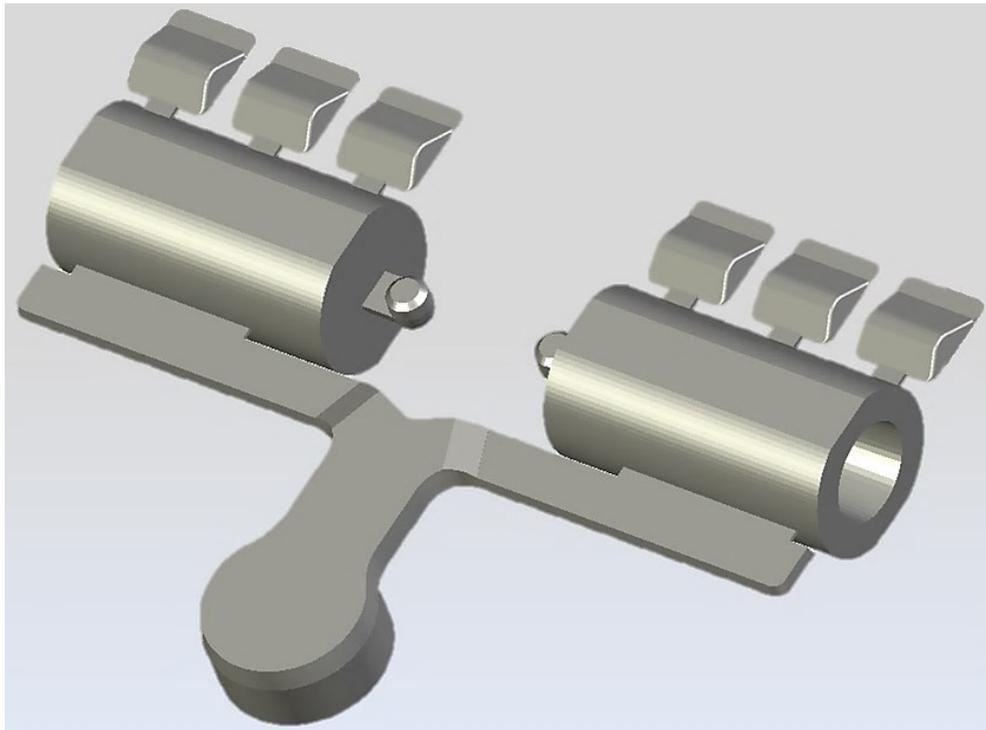


Abbildung 5-7: CAD 3D-Modell, Version 2, gesamter Abguss.

5.3.1 Ergebnisse der Simulation von Version 2

In der Simulation zeigte sich mit dem optimierten Angussystem die erhoffte Verbesserung der Füllung des Probekörpers. Durch die Abänderung des Überlaufs wurde die Bedingung, sich erst nach abgeschlossener Füllung des Gussteils zu füllen, erreicht.

Bei der Ausbildung des Hot-Spots wurden keine Abweichungen zu Version 1 verzeichnet. In den Simulationsbildern der Erstarrungszeiten zeigte sich, dass der Anschnitt und die Überlaufbohlen nach ca. 2 Sekunden geschlossen sind und somit der Squeeze-Vorgang gestartet werden kann. Mit fortschreitender Erstarrung wird jedoch die Problematik deutlich, dass bereits nach ca. 6,8 Sekunden (Gesamterstarrungszeit), die Anbindung an das Gussteil und das Squeeze-Reservoir *abgefroren* sind. Dieser Zeitraum von etwa 5 Sekunden stellt eine zu kurze Dauer dar, um ein effizientes Squeezen zu gewährleisten und der Erstarrungsschwindung im Hot-Spot entgegenzuwirken. Auch hier sei erwähnt, dass MAGMASoft Bereiche mit 40 % Festphasenanteil als erstarrt bewertet (siehe Kap. 5.2.1). In Abbildung 5-8 ist das zugehörige Simulationsbild des gesamten Abgusses bei einer Erstarrungszeit von ca. 6,8 Sekunden zu sehen.

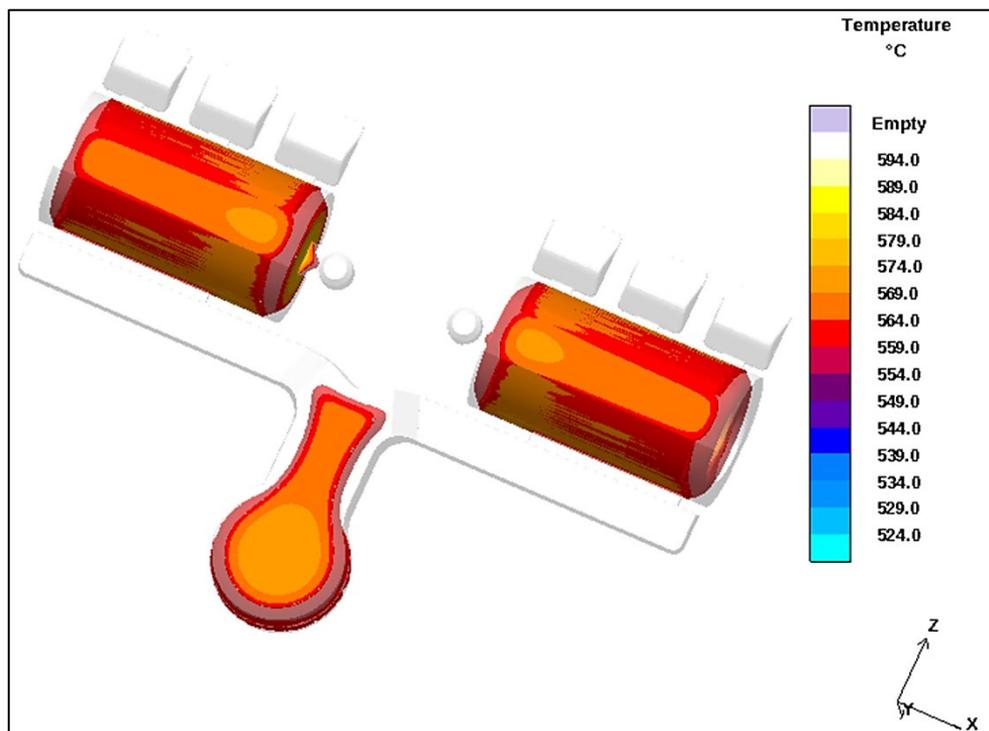


Abbildung 5-8: Simulationsbild Erstarrung, Version 2, gesamter Abguss bei 6,8 Sek. Erstarrungszeit nach der Formfüllung.

Abbildung 5-9 zeigt die Restluftmenge (grau) im gesamten Schuss von Version 2, bei einem Füllgrad von 90 %. Mithilfe dieser Darstellung aus der Simulation wird ersichtlich, dass sich mit hoher Wahrscheinlichkeit ungünstige Lufteinschlüsse im Probenkörper bilden werden. Die weiträumige Verteilung der Restluft über das gesamte Gussteil bringt eine deutliche Minderung der Gussqualität mit sich.

Ursache für diese Lufteinschlüsse war ein zu klein bemessener Querschnitt des Anschnitts, wodurch zu hohe Geschwindigkeiten beim Füllvorgang erreicht wurden. Ein breiterer Querschnitt würde eine Senkung der Anschnittsgeschwindigkeiten mit sich bringen. Zusätzlich bietet die verhältnismäßig hohe Wandstärke ein erhöhtes Potential für Porosität in der Probe, wodurch eine Abnahme der Wanddicke erstrebenswert ist. Eine Wandstärkenabnahme bringt neben einer Reduktion des Schussgewichts auch einen geringeren Wärmeinhalt des Abgusses mit sich.

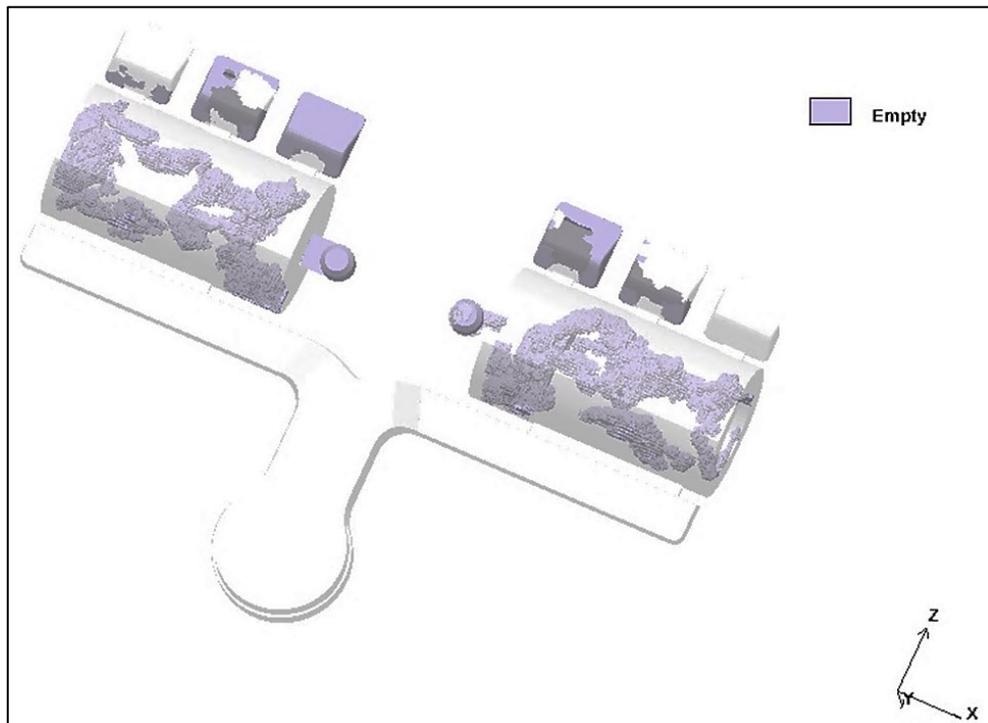


Abbildung 5-9: Simulationsbild Entlüftung, Version 2, gesamter Abguss mit Restluft-Verteilung (grau).

Für die nächste Stufe der Entwicklung sind somit ein größeres Squeeze-Reservoir, sowie eine dünnere Wandstärke und ein größerer Querschnitt des Anschnitts, für eine bessere Formfüllung und Entlüftung, vorgesehen.

5.4 Version 3

In diesem Schritt der Entwicklung des Testwerkzeugs wurde das Reservoir und die Anbindung dessen an das Gussteil wesentlich größer dimensioniert. In Untersuchungen von [32] stellt ein definiertes Verhältnis von Breite zu Höhe von 2,3 [-] ein ideales Verhältnis aus Kanalquerschnitt und Temperaturgradient dar. Daher wurden für die Form der Anbindung zwei aufeinander gesetzte Trapeze, welche mit deren Basen normal zur Formteilung ausgerichtet sind, gewählt. Die Form des Reservoirs besteht aus zwei aufeinandergesetzten, konischen Zylindern mit abgefastem Rand. Die Anbindung wurde hier mittig an das Reservoir gesetzt. Die Reduktion der Wandstärke wurde durch den Einsatz von Kernen mit einem größeren Durchmesser realisiert.

Näherungsweise kann mithilfe einer Speiserhalsberechnung bzw. über das Erstarrungsmodul nach Chvorinov die Erstarrungszeit $t_E = C_1 \cdot M^2$ [s] bis zum Abfrieren der Anbindung bestimmt werden. Das Erstarrungsmodul $M = \left(\frac{V}{O}\right)$ [m] ist definiert als das Verhältnis von Volumen- zu Oberflächenabmessung, womit sich für die Dimensionierung des Reservoirs und der Anbindung theoretisch folgende Bedingung ergibt: $M_{Bauteil} < M_{Anbindung} \leq M_{Reservoir}$.

Eine CAD 3D-Darstellung dieser Version 3 ist in Abbildung 5-10 zu sehen.

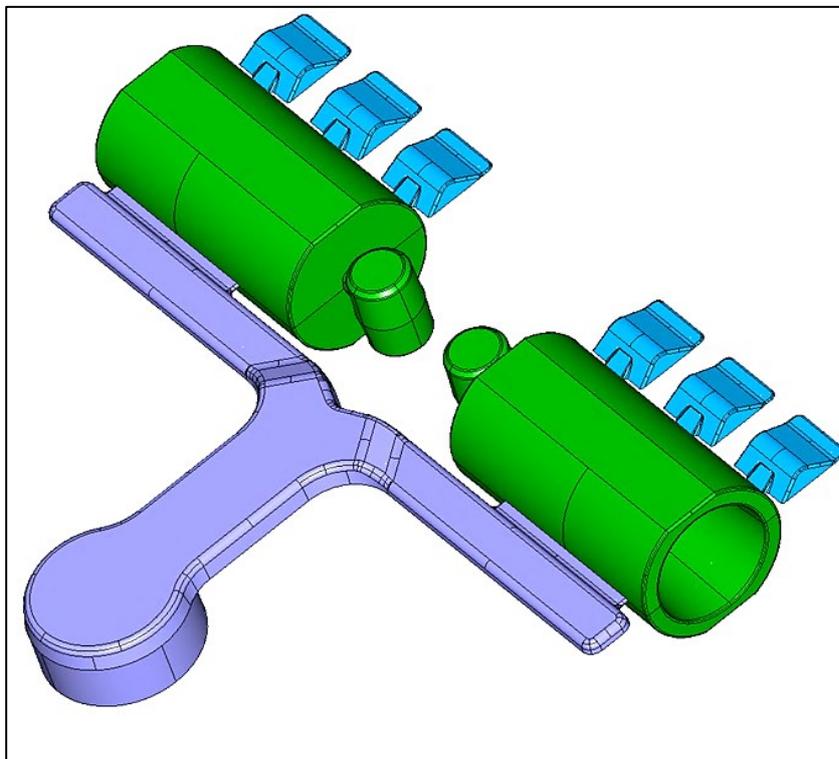


Abbildung 5-10: CAD 3D-Modell, Version 3, gesamter Abguss.

5.4.1 Ergebnisse der Simulation von Version 3

Abbildung 5-11 zeigt eine Darstellung des Erstarrungsverlaufs bei einem Zeitpunkt von ca. 6,9 Sekunden. Im Vergleich mit Version 2 (siehe Abbildung 5-8) wird sofort der Unterschied, im Hinblick auf das Reservoir, ersichtlich. Beide Aufnahmen wurden in etwa zum gleichen Zeitpunkt im Erstarrungsverlauf genommen. In Version 2 war bereits das Reservoir und die Anbindung abgefroren, wohingegen in Version 3 bei gleichem Zeitpunkt ein wirkungsvolles Squeezing mit hoher Wahrscheinlichkeit noch gegeben ist. Bei Betrachtung der fortschreitenden Erstarrung des Probenkörpers wird erst bei einem

Zeitpunkt von ca. 15 Sekunden ein Abschnüren des Reservoirs festgestellt. Folglich steht durch die Modifikation des Reservoirs ein mehr als doppelt so langer Zeitraum für das Nachverdichten zur Verfügung und lässt somit auch mehr Raum für Variationen der Squeeze-Parameter.

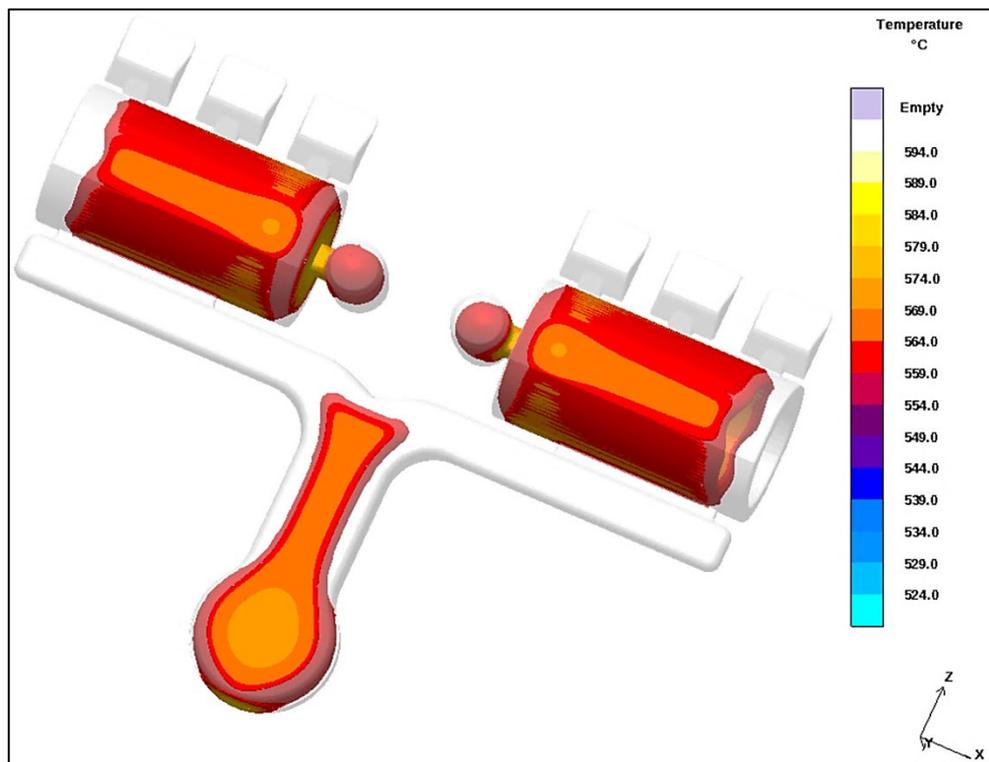


Abbildung 5-11: Simulationsbild Erstarrung, Version 3, gesamter Abguss.

In Abbildung 5-12 ist die Restluftmenge (grau) im gesamten Schuss von Version 3, bei einem Füllgrad von 90 % dargestellt. Im Vergleich zu Version 2 (siehe Abbildung 5-9) zeigt sich, durch den größeren Anschnittsquerschnitt, eine verbesserte Entlüftung und eine geringere Menge an verbleibender Luft im Probekörper. Im linken Probekörper (links im Bild) wurde trotzdem ein gesteigerter Anteil an Restluft festgestellt. Dieser Umstand könnte in vermehrter Porosität im Gussteil resultieren.

An dieser Stelle muss festgehalten werden, dass sich in der Simulation numerisch bedingte Störungen mit jedem Berechnungsschritt verstärken können und demnach ein verzerrtes Resultat nach sich zieht.

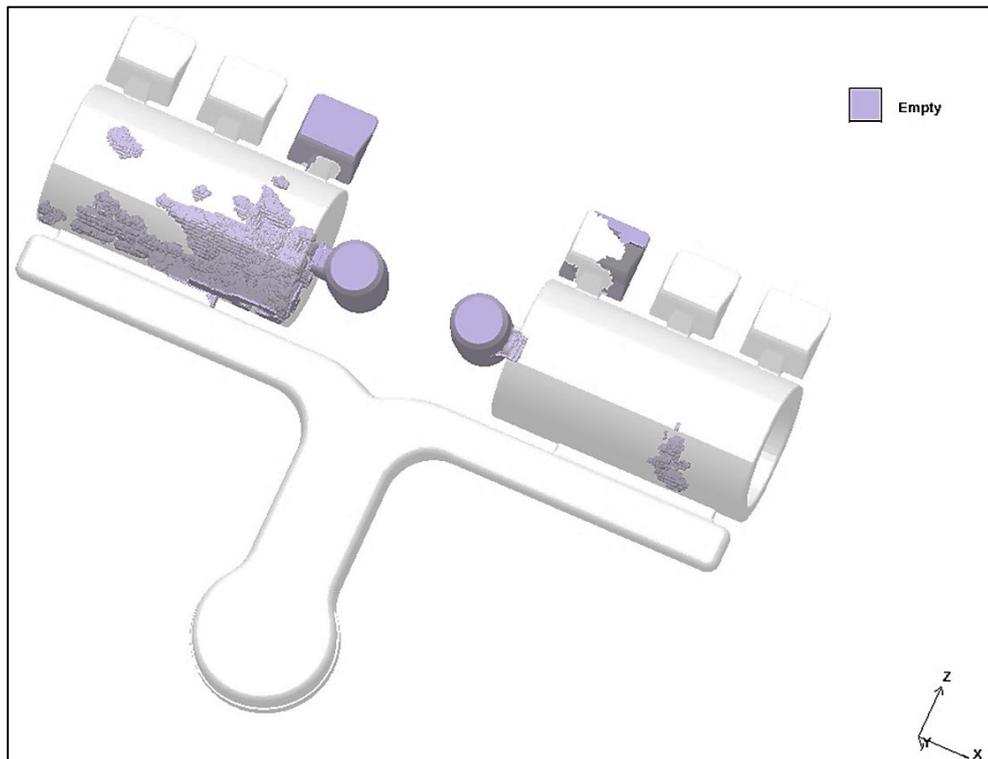


Abbildung 5-12: Simulationsbild Entlüftung, Version 3, gesamter Abguss mit Restluft-Verteilung (grau).

Zur Beseitigung dieser möglichen Entlüftungsproblematik des Gussteils wurden Entlüftungskänaele mit Anbindung an zwei Überlaufbohlen und ans Reservoir gesetzt (siehe kleines Bild in Abbildung 5-13). Eine neuerliche Simulation mit dieser Modifikation wurde nicht mehr durchgeführt.

Nach diesen Optimierungsschritten der Geometrie wurde ein Druckgießwerkzeug gefertigt. Abbildung 5-13 zeigt eine 3D-CAD Zeichnung der beweglichen Formhälfte mit der Kernzugeinrichtung und den nachträglich installierten Entlüftungskänaelen im Formeinsatz (kleines Bild).

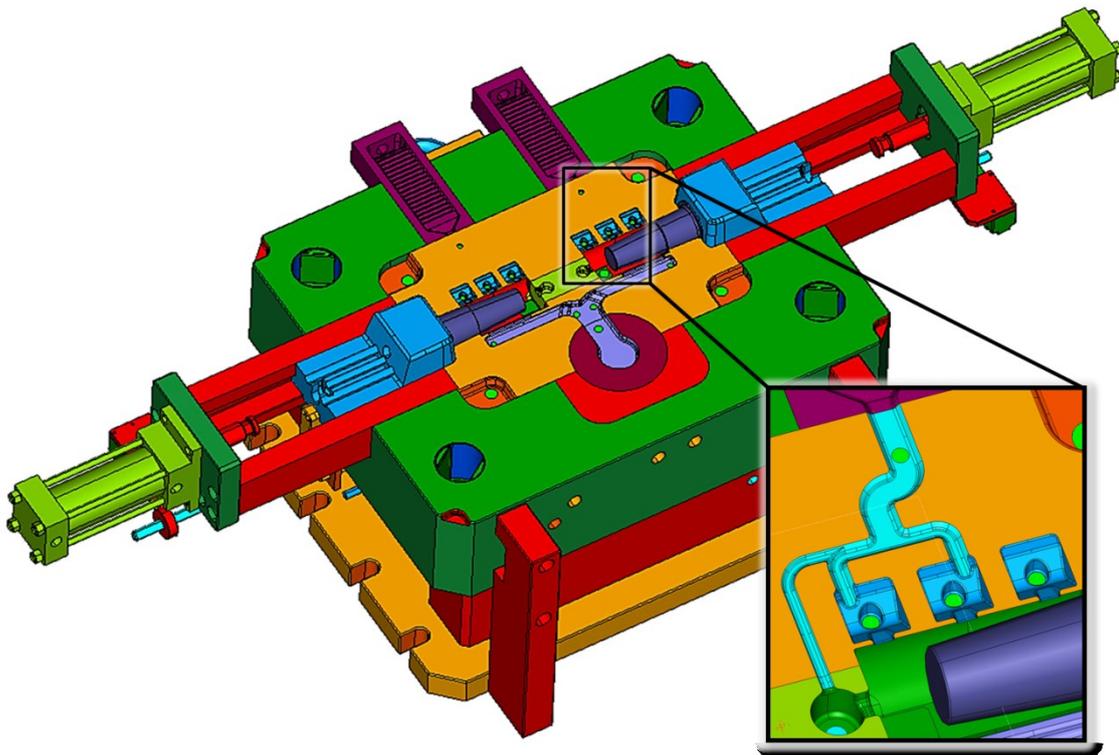


Abbildung 5-13: 3D-CAD Zeichnung der beweglichen Formhälfte mit je einem Kernzug pro Nest und Entlüftungsbahnen (kleines Bild).

5.4.2 Berechnung Verdrängungsvolumen

Mit dem Versuchswerkzeug können unterschiedliche Squeeze-Pin-Durchmesser (10, 12, 14 mm) und verschiedene Konturen der Squeeze-Spitze (plan, dreieckig, halbkugelförmig) getestet werden.

Anhand einer Berechnung der Erstarrungsschwindung kann abgeschätzt werden, ob das Verdrängungsvolumen des Squeeze-Pins, berechnet aus Pin-Durchmesser und Verdichtungshub, für eine lokale Nachverdichtung ausreichend ist. Der dickwandige Bereich des Hot-Spots nimmt theoretisch ein Volumen von ca. 80.000 mm^3 ein. Der Volumenanteil der Erstarrungsschwindung (3 – 6 %) nimmt bei einer AlSi9Cu3(Fe) -Legierung Werte zwischen 2377 und 4755 mm^3 an. In Tabelle 5-1 sind errechnete Werte des Verdrängungsvolumens bei unterschiedlichen Squeeze-Pin-Durchmessern angegeben. Aus dieser geht hervor, dass theoretisch bei kleinster angenommener Schwindung, ein Pin-Durchmesser von 10 mm für eine annähernd vollständige Nachverdichtung ausreichend ist.

Tabelle 5-1: Verdrängungsvolumen des Squeeze-Pins bei unterschiedlichen Pin-Durchmessern.

Ø Squeeze-Pin [mm]	Verdrängungsvolumen bei 30 mm Hub [mm ³]
10	2356
12	3393
14	4618

In dem Versuchswerkzeug beträgt das Reservoir-Volumen mit Anbindung 16.500 mm³ und ist somit für eine Nachverdichtung ausreichend groß dimensioniert

6 Versuchsabgüsse mit dem Testwerkzeug

Eine erste Versuchsreihe diente primär der Findung geeigneter Gießparameter und zur Überprüfung der Funktionalität des Werkzeugs. Ziel war es, die Bildung eines Hot-Spots und die dadurch entstehenden Ungängen sowie deren Lage im Probenkörper zu verifizieren. Die Versuche befassten sich daher noch nicht mit der Wirkung des Nachverdichtens. Abbildung 6-1 zeigt die bewegliche Formhälfte des Testwerkzeugs (Standardarbeitsstahl 1.2343) und den Formeinsatz mit nachträglich gefrästen Entlüftungsbahnen (kleines Bild, rechts unten). In der Form ist der tauschbare Block mit den Ausnehmungen der Squeeze-Reservoirs (1), der Squeeze-Pin für indirektes Nachverdichten (2), der Stempel für direktes Nachverdichten (3) und die beiden kühlbaren Kerne (4) zu sehen.

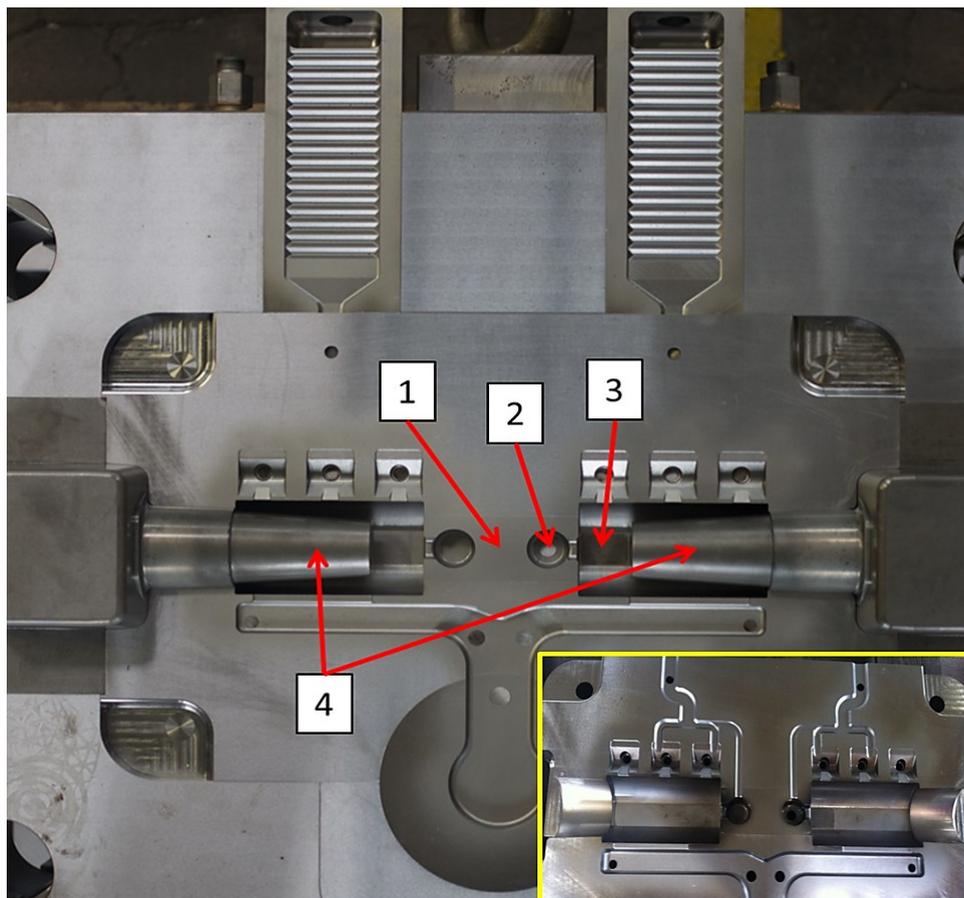


Abbildung 6-1: Bewegliche Formhälfte des Testwerkzeugs und Formeinsatz mit Entlüftungsbahnen (rechts unten); (1) tauschbarer Block mit den Ausnehmungen der Squeeze-Reservoirs, (2) Squeeze-Pin für indirektes Nachverdichten, (3) Stempel für direktes Nachverdichten, (4) kühlbare Kerne.

6.1 Ergebnisse der Versuchsabgüsse

Während der Versuche hat sich gezeigt, dass eine hohe Gießkolbengeschwindigkeit, wie in Variante 2 (siehe Tabelle 3-1) mit 3,5 [m/s], zu einer starken Metallisierung an der Unterseite der Kerne, d. h. die dem Anschnitt zugewandte Seite, führte. Dadurch kam es zu Komplikationen beim Auswerfen und Ausfahren der Kerne, weshalb die Versuchsreihe der Variante 2 nach vier Abgüssen abgebrochen wurde. Grund dafür ist vermutlich eine zu hohe Anschnittsgeschwindigkeit der Schmelze. Abhilfe kann hier ein breiter Anschnitt (größerer Querschnitt) schaffen, wodurch die Strömungsgeschwindigkeit des Metalls gesenkt und die Neigung zum Ankleben der Schmelze an den Kernen gemindert wird.

6.1.1 Thermografie

Abbildung 6-2 zeigt zwei Thermografie-Aufnahmen der beweglichen Formhälfte mit (oberes Bild) bzw. ohne Kernkühlung (unteres Bild). Beide Aufnahmen wurden unmittelbar nach dem Auswerfen des Abgusses, also ohne Auftrag von Sprühmittel, gemacht. Zwischen diesen beiden Aufnahmen liegt ein Abstand von 10 Gieß-Zyklen. Im Vergleich sieht man, dass nicht nur die Temperatur der Kernoberfläche anstieg, sondern auch jene der Formnester, in denen großflächig Temperaturen über 330°C gemessen wurden. Dies lässt den Schluss zu, dass mit jedem Schuss die Kern- und Formtemperatur zunimmt bzw. die Kernkühlung auch Einfluss auf die Temperaturverteilung im gesamten Formnest hat. Ein ständiger Betrieb ohne Kernkühlung könnte zu einer starken Überhitzung der Form führen und folglich zu einem frühzeitigen Versagen des Werkzeugs. Zum Thema Kühlwirkung in Druckgussformen kann auf Untersuchungen zur Kühlwirkung in Druckgussformen [33] verwiesen werden.

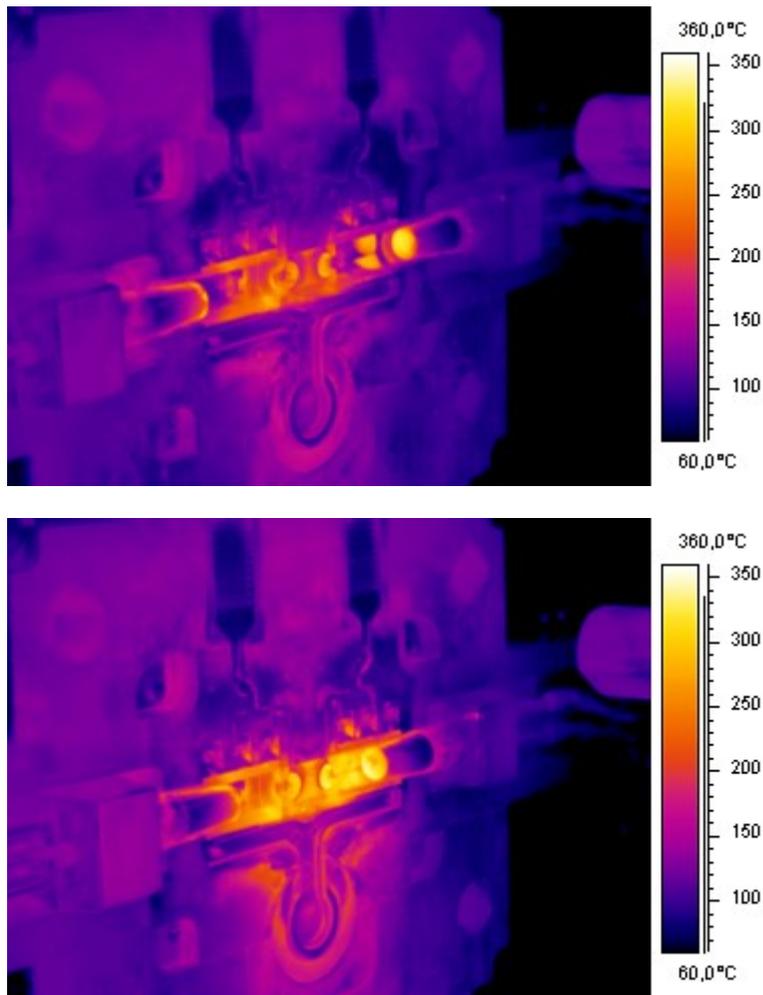


Abbildung 6-2: Wärmebildaufnahmen der beweglichen Formhälfte mit Kernkühlung (oben) bzw. ohne Kernkühlung (unten).

6.1.2 Metallografie

Abbildung 6-3 zeigt einen in der Längs- und in der Querrichtung zerteilten Probekörper. Wie aufgrund der Berechnungen in der Simulation zu erwarten war, hat sich vor der Kernspitze, ein größerer Erstarrungslunker gebildet. Neben der Erstarrungsschwindung wurden auch kreisrunde Poren verzeichnet. Aufgrund ihrer Form und der Innenoberfläche handelt es sich um Gasausscheidungen, die sich im langsam erstarrenden Bereich sammeln.

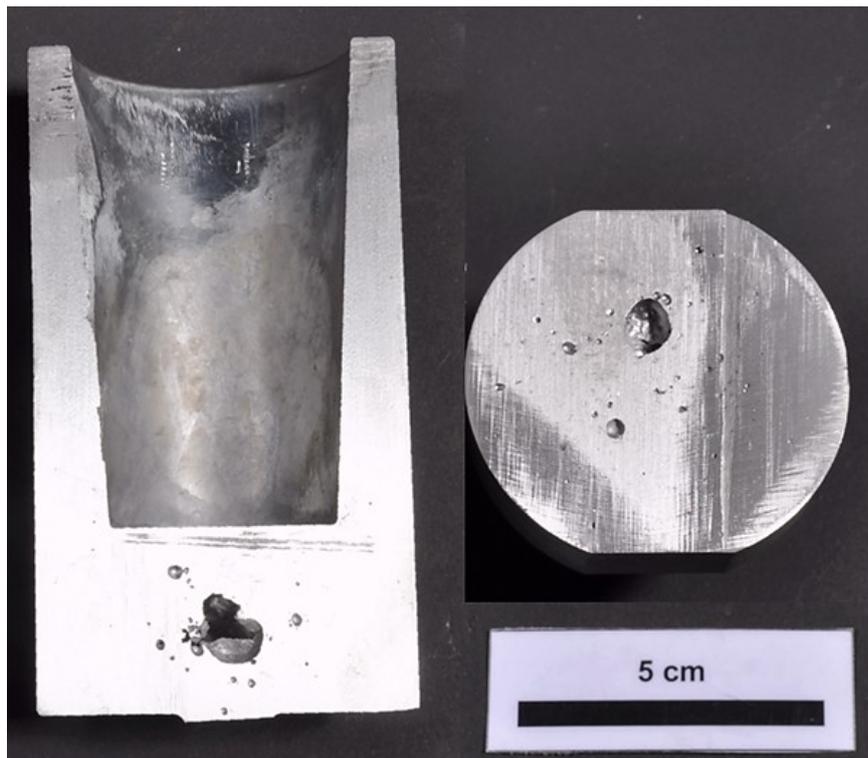


Abbildung 6-3: Längsschnitt (links) und Querschnitt (rechts) durch einen Probenkörper.

Abbildung 6-4 zeigt eine Übersichtsaufnahme des Gefüges im dickwandigen Bereich der Probe. Neben dem bereits erwähnten großen zentralen Lunker in der Mitte des untersuchten Bereichs, ist deutlich eine Zone mit stark aufgelockertem Gefüge zu erkennen. Demnach konnte in der ersten Versuchsreihe die generelle Eignung des Testwerkzeugs zur Erzeugung von Gussteilen mit starker Porosität an definierten Stellen bestätigt werden

Nach Durchsicht metallografischer Schlitte von ausgewählten Proben hat sich gezeigt, dass sich selbst bei maximalem Nachdruck von ca. 1000 bar die Größe der Poren zwar verringert, jedoch der Anteil an vorhandener Porosität generell zu hoch ist. Ursache hierfür ist ein zu klein dimensionierter Anschnittsquerschnitt, der eine hohe Geschwindigkeit der Schmelze und folglich eine turbulente Formfüllung bewirkt. Die dadurch mitgerissene Luft zeichnet sich durch erhöhte Gasporosität im Gussteil ab. Auch der Entlüftungsquerschnitt ist eventuell zu klein bemessen, sodass die eingewirbelte Luft nicht entweichen kann und als Gasausscheidung im Gussteil verbleibt.

Eine Wirkung der Kernkühlung, zur Verringerung von Porosität im definierten Bereich, konnte nicht festgestellt werden. Um die Sensitivität der Kernkühlung zu erhöhen,

könnte ein Ersetzen der verbauten Kerne durch längere, zur Verkleinerung des definierten Bereichs, Abhilfe verschaffen. Des Weiteren würde der Einbau längerer Kerne das Verhältnis von Anschnittsquerschnitt zu Wandstärke des Probenkörpers verringern, wodurch eine intensivere Nachverdichtung, zu erreichen wäre.

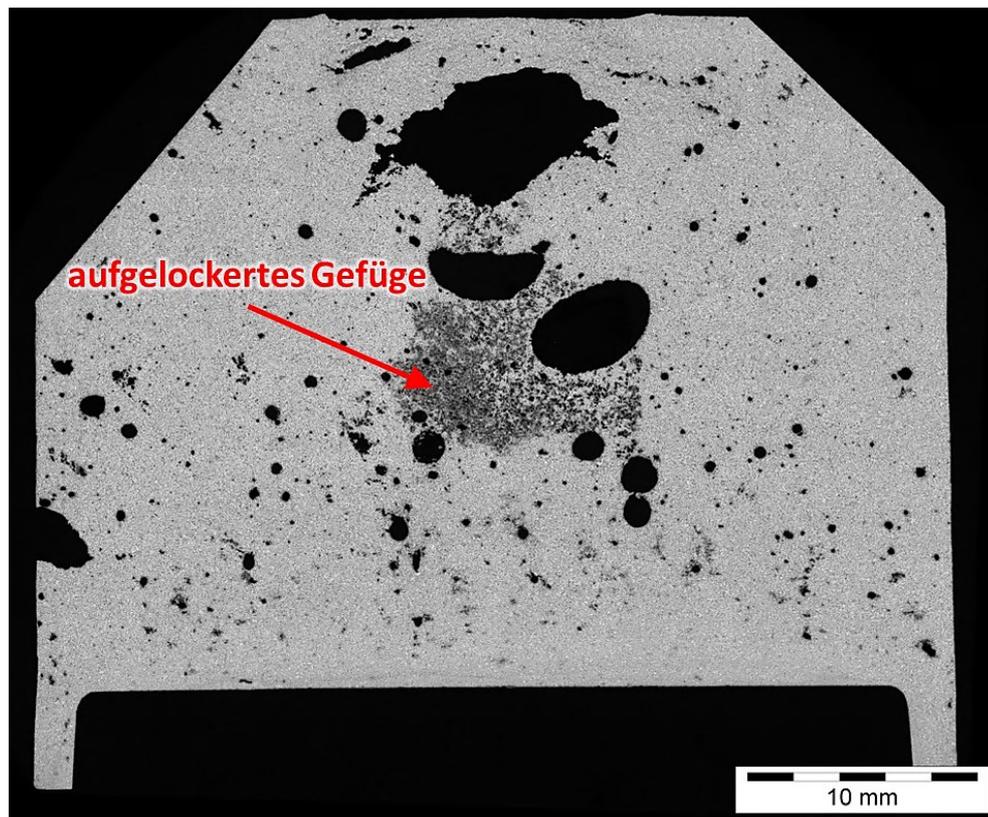


Abbildung 6-4: LM, Übersicht des Hot-Spot-Bereichs eines Probenkörpers 800 bar Nachdruck.

Durch eine Optimierung und Überarbeitung der Werkzeuggeometrie, wie größerer Anschnitt- bzw. Entlüftungsquerschnitt und längere Kerne, sollte das Problem der Gasporosität verringert und die Wirkung der Kernkühlung erhöht werden.

7 Zusammenfassung

7.1 Allgemein

Porosität, gas- oder erstarrungsbedingt, stellt eines der Hauptprobleme im Druckgießverfahren dar. In oftmals konstruktionsbedingten, dickwandigen Bereichen, sprich Materialanhäufungen oder bei sprunghaften Übergängen der Wandstärke, kommt es zu überhitzten Stellen, sogenannten *Hot-Spots*. In diesen tritt vermehrt Porosität bzw. aufgelockertes Gefüge auf, welches oft eine beträchtliche Minderung der festigkeitsrelevanten Eigenschaften mit sich bringt. Werden höhere Anforderungen an die Dichtheit dieser Bereiche gestellt, kann ein mechanisches, lokales Nachverdichten, das Squeezen, Abhilfe schaffen. Eine Literaturrecherche hat ergeben, dass durch Verwendung von Squeeze-Pins in Druckgussformen eine Kompensation erstarrungsbedingter Porosität bewirkt werden kann. Ein erfolgreicher Squeeze-Vorgang setzt folgende Bedingungen voraus:

- Verdichtungshub und Durchmesser des Squeeze-Pins müssen ausreichend groß dimensioniert sein, um der Erstarrungsschwindung entgegenzuwirken.
- Der Squeeze-Vorgang darf frühestens mit geschlossenem Anschnitt begonnen werden bzw. muss vor der Bildung einer für den Squeeze-Pin undurchdringbaren Randschale gestartet werden.
- Der Druck des Squeeze-Pins muss so bemessen sein, dass ausreichend Material gefördert werden kann bzw. darf nicht zu hoch sein, um nicht bereits erstarrte Bereiche zu schädigen.

7.2 Untersuchungen für die Industrie

7.2.1 Lenkergehäuse Fa. TCG Unitech

Die untersuchten Gussteile wurden an zwei Stellen im Bauteil direkt gesqueezt. Die Versuchsreihe umfasste Variationen der Squeeze-Parameter Einfahrzeitpunkt, Druck und Geschwindigkeit.

In der Auswertung der mittels Fast-Scan erstellten CT-Aufnahmen konnte zwar Porosität, jedoch keine Risse detektiert werden. Die Untersuchungen in der CT dienten somit vorrangig dazu eine exakte Position der Probenentnahme für die Schliffherstellung zu ermitteln.

In den metallografischen Untersuchungen der Squeeze-Bereiche wurde eine Zone mit verdrängtem Material festgestellt. Eine REM-EDX-Analyse im Übergangsbereich zwischen dem vom Stempel beeinflussten und unbeeinflussten Bereich ergab eine ungleiche Elementverteilung von Silizium und Kupfer. Ein Vergleich der Squeeze-Bereiche, unter Einbeziehung der Parameter-Variationen hat gezeigt, dass ein spät gestarteter Squeeze-Vorgang und ein hoher Squeeze-Druck massive Schädigungen im Gefüge (Risse, Materialtrennungen, Gefügeinhomogenität) verursachen. Ein frühes Einfahren des Stempels und ein geringer Squeeze-Druck zeigten hingegen kaum Wirkung in dem zu verdichtenden Bereich. Es wurde somit eine eindeutige Abhängigkeit einer Parametervariation auf die Qualität der Squeeze-Bereiche festgestellt.

Die Standardparameter-Einstellung hat im ganzen Versuchsfeld stets das beste Ergebnis erzielt. Dies lässt den Schluss zu, dass bereits im Vorfeld der Untersuchungen firmenintern eine empirische Optimierung der Squeeze-Parameter durchgeführt wurde.

7.2.2 Getriebegehäuse Fa. ADG

Für die Untersuchung standen neben indirekt bzw. nicht nachverdichteten Gussteilen auch eine modifizierte Variante zur Verfügung, bei der die Squeeze-Einrichtung durch gekühlte Kernstifte ersetzt wurde.

Eine CT-Untersuchung mittels Fast-Scan bestätigte den positiven Einfluss des lokalen Nachverdichtens im gewünschten Bereich. Die Untersuchung von Schliffproben zeigte eine deutliche Richtungsabhängigkeit des verdrängten Materials vom Reservoir in den Squeeze-Bereich. Daneben wurde auch z. T. starke Porosität in den gesqueezten Bereichen sowie Materialtrennungen entlang der Fließlinien verzeichnet, wodurch es bei einer nachfolgenden Bearbeitung zu Problemen kommen kann. Bei der modifizierten Version wurde im Vergleich zum gesqueezten Gussteil keine merkliche Verbesserung im Porositätsaufkommen verzeichnet.

Zusätzlich wurden Daten einer firmeninternen Sichtprüfung der Squeeze-Bereiche von der Fa. ADG ausgewertet, welche Angaben über Gefügequalität und Einfahrtiefe des Stempels beinhalteten. Die Auswertung ergab, dass generell mit steigender Einfahrtiefe ein besseres Squeeze-Ergebnis zu erwarten ist. Das Resultat besitzt jedoch nur beschränkte Aussagekraft, da keine weiteren Parameter zu Verfügung standen.

7.3 Entwicklung eines Druckgieß-Versuchswerkzeuges

Basierend auf der Literaturrecherche und den Ergebnissen aus der Untersuchung von Gussteilen aus der Industrie, wurde ein Konzept für ein Testwerkzeug entworfen, um Einflussmöglichkeiten auf Gefüge- und Bauteilqualität durch mechanische (und thermische) Maßnahmen zu eruieren. Das Testwerkzeug sollte folgende Bedingungen erfüllen:

- An definierter Stelle der Probe soll sich ein Hot-Spot ausbilden können, der durch direktes oder indirektes Squeezzen theoretisch vollständig nachverdichtet werden könnte.
- Es sollten verschiedene Kombinationen von Stempel- und Reservoirgeometrie getestet werden können sein.
- Eine voneinander unabhängige Einstellung der Squeeze-Parameter mit Aufzeichnung der Ist-Größen.
- Der Abguss einer nachverdichteten Probe und einer Referenz mit einem Schuss sollte möglich.

Die Realisierbarkeit des Konzepts in einem realen Druckgießwerkzeug wurde mittels numerischer Simulation überprüft. Nach mehreren Optimierungsschritten wurde das Testwerkzeug gefertigt.

In einer Versuchsreihe wurde die Funktionalität des Werkzeugs getestet bzw. diente primär dem Finden geeigneter Gießparameter und befasste sich nicht mit der Wirkung des Squeezens. In metallografischen Untersuchungen zeigten die Gussteile aus einer AlSi9Cu3(Fe)-Legierung wie gefordert massive Erstarrungsporosität an der gewünschten Stelle. Neben der Erstarrungsschwindung wurde auch deutliche Gasporosität festgestellt, bedingt durch eine zu hohe Anschnittgeschwindigkeit bzw. durch einen zu klein dimensionierten Entlüftungsquerschnitt.

8 Ausblick

Aufgrund der Ergebnisse der ersten Versuche sollte das Formkonzept noch durch eine Modifikation des Anschnitts und der Entlüftung bzw. durch Änderung der Kerngeometrie optimiert werden. Die Wirkungsweise des Squeezens bzw. die Erforschung von Form- und Technologieparameter (direkt oder indirekt, Squeeze-Druck und -Zeitpunkt, Pingeometrie, Reservoir-Anbindung) wird in folgenden Versuchsreihen im Rahmen weiterer Arbeiten untersucht werden.

Zur Bestimmung des Squeeze-Startzeitpunkts kann in der Erstarrungs- und Formfüllungssimulation durch die Positionierung eines fiktiven Thermoelements im Reservoir jener Zeitpunkt ermittelt werden, bei dem die Schmelze in den thixotropen Bereich übergeht. Basierend auf thermodynamischen Berechnungen, wie z. B. ThermoCalc, kann der Festphasenanteil für verschiedene Legierungen über die Temperatur bestimmt werden. Damit kann die Temperatur bei der der Festanteil ca. 50 % beträgt, mit der Temperatur und der Zeit aus der Erstarrungssimulation abgeglichen werden, um einen optimalen Zeitpunkts für den Start des Squeeze-Vorgangs zu definieren.

Weiters kann durch praktische Untersuchungen mit dem Gießwerkzeug der ideale Zeitpunkt für das Ausziehen des Pins ermittelt werden, um eine Rissbildung, die durch ein vorzeitiges Ausziehen bzw. durch Aufschrumpfung der Randschale an den Squeeze-Pin auftreten kann, zu vermeiden.

Eine potenzielle Auswertung zur Ermittlung geeigneter Squeeze-Parameter könnte durch das Auftragen der Fehleranzahl, wie z. B. Porosität- über Rissaufkommen von Proben mit unterschiedlichen Squeeze-Drücken in Abhängigkeit von der Squeeze-Dauer, realisiert werden (vgl. Abbildung 4-16). Dafür sollte aber eine genügend große Anzahl von Gussteilen für die Untersuchung zu Verfügung stehen, damit sich eine erfassbare Tendenz für eine definierte Parametereinstellung abzeichnet. Ein mögliches Schema für eine Statistik mit Definition der jeweiligen Grenzbereiche ist in Abbildung 8-1 zu sehen.

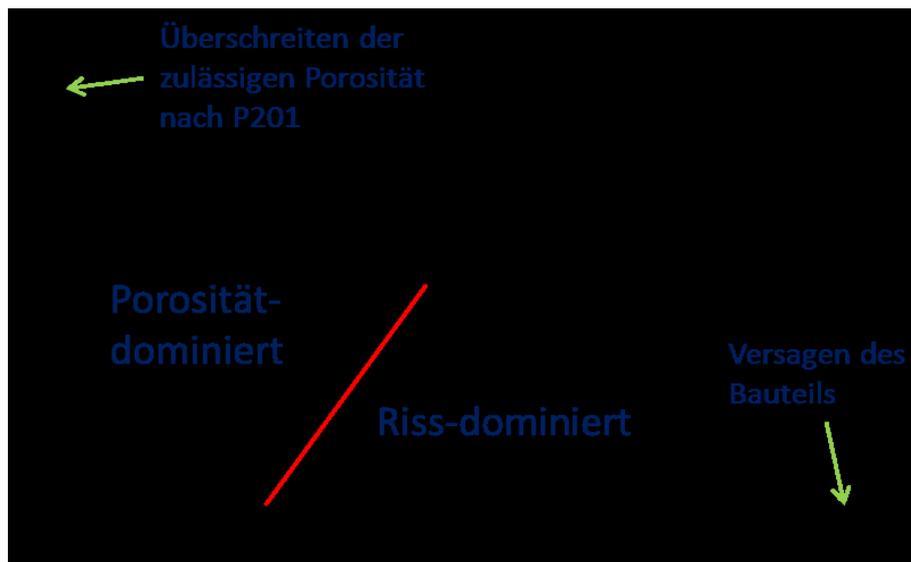


Abbildung 8-1: Schema einer potentiellen Auswertung für die Abhängigkeit von Rissen und Porosität zu Squeezeparameter.

Literaturverzeichnis

- [1] Ostermann, F., Anwendungstechnologie Aluminium: Formgießverfahren, 2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2007, S. 411 ff.
- [2] Nogowizin, B., Theorie und Praxis des Druckgusses: Druckguss und Sonderentwicklungen des Druckgießverfahrens, Fachverlag Schiele & Schön GmbH, Berlin, 2011, S. 153 ff.
- [3] Brunhuber, E., Praxis der Druckgussfertigung, Fachverlag Schiele & Schön GmbH, Berlin, 1991, S. 16 ff.
- [4] Nogowizin, B., Theorie und Praxis des Druckgusses: Hauptparameter des Druckgießverfahrens, Fachverlag Schiele & Schön GmbH, Berlin, 2011, S. 189 ff.
- [5] Kurz, W. and D.J. Fisher, Fundamentals of Solidification: Introduction, Fourth Revised Edition, Trans Tech Publications Ltd., Ütikon-Zürich, 1998, S. 1 ff.
- [6] Ostermann, F., Anwendungstechnologie Aluminium: Legierungsaufbau und Wärmebehandlung von Gusslegierungen, 2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2007, S. 189 ff.
- [7] Engler, S., Erstarrung metallischer Schmelzen: Eigenschaften des fließenden und erstarrenden Metalls, Deutsche Gesellschaft für Metallkunde, Oberursel, 1981, S. 7 ff.
- [8] Brunhuber, E. (Hrsg.), Gießerei-Lexikon, 15. Auflage, Fachverlag Schiele & Schön GmbH, Ausgabe 1991.
- [9] Aleris Switzerland GmbH, Aluminium-Gusslegierungen, Ausgabe 6/11, 1. Auflage, 2011, S. 13 ff.
- [10] Buchmayr, B., Werkstoff- und Produktionstechnik mit Mathcad: Konstitutionelle Unterkühlung und Gefügemorphologie, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2002, S. 301 ff.
- [11] Eskin, D.G. et al., Mechanical properties in the semi-solid state and hot tearing of aluminium alloys, Progress in Materials Science, 49 (2004), S. 629-711.
- [12] Campbell, J., Complete Casting Handbook: Cracks and tears, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2011, S. 465 ff.
- [13] Nogowizin, B., Theorie und Praxis des Druckgusses: Druckgusslegierungen und ihre Eigenschaften, Fachverlag Schiele & Schön GmbH, Berlin, 2011, S. 4 ff.

- [14] Klos, R., Aluminium-Gusslegierungen: Vielseitiger Konstruktionswerkstoff der Kreislaufwirtschaft. In: Die Bibliothek der Technik, Bd. 116, Verlag Moderne Industrie, 1995, S. 26 ff.
- [15] Verein deutscher Gießereifachleute (Hrsg.), VDG-Merkblatt P201: Volumendefizite von Gussstücken aus Nichteisenmetallen, Mai 2002.
- [16] Treitler, R., Vom Gießprozess zur Festigkeitsberechnung an einer Aluminium-Magnesium-Druckgusslegierung, Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), 2005.
- [17] Nogowizin, B., Porosität in Druckgussteilen, Druckgusspraxis (2004), Nr. 5, S. 192-200.
- [18] ÖGI – Österreichisches Gießerei-Institut, Schulungsprogramm: Gefügefehler und Gefügeanomalien von Druckgussteilen, 2008.
- [19] Hasse, S., Guss- und Gefügefehler, Fachverlag Schiele & Schön GmbH, Berlin, 1999, S. 132 f. und S. 162 f.
- [20] Bundesverband der deutschen Gießerei-Industrie (Hrsg.), VDG-Merkblatt P202: Volumendefizite von Gussstücken aus Aluminium-, Magnesium- und Zinkgusslegierungen, September 2010.
- [21] Pellini, W. S., Strain Theory of Hot Tearing, Foundry, 80 (1952), S. 125-199.
- [22] Li, S., Hot tearing in Cast Aluminum Alloys: Measures and Effects of Process Variables, Dissertation, Worcester Polytechnic Institute USA, 2010.
- [23] Kim, E.S., K.H. Lee and Y.H. Moon, A feasibility study of the partial squeeze and vacuum die casting process, Journal of Materials Processing Technology, 105 (2000), S. 42-48.
- [24] Suzuki, H. et al., United States Patent US 4380261 A: Die-casting method, 19.4.1983.
- [25] Binney, M., M. Dargusch, M. Nave and P. McKinney, Porosity Reduction in a High Pressure Die Casting Through The Use of Squeeze Pins, Die Casting in The Heartland, Indianapolis, USA, 2003.
- [26] Carman, P. C., Flow of Gases through Porous Media, Butterworths Scientific Publications, London, 1956.
- [27] Pabel, T., S. Bozorgi, Ch. Kneißl und K. Färber, Einfluss der Legierungselemente auf die Heißrisneigung von AlSi7MgCu-Gusslegierungen, Giesserei 99 (2012) Nr. 9, S. 30-37.

- [28] Schögg, L. et al., Werkstoffprüfung: Methoden der zerstörenden und zerstörungsfreien Werkstoffprüfung, 1. Auflage, TÜV Austria Akademie GmbH, Wien, 2011, S. 133 ff.
- [29] Buzug, T.M., Einführung in die Computertomografie: Detektion von Röntgenstrahlung, 1. Nachdruck, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 2005, S. 25 ff.
- [30] GE Measurement & Control Solutions, 3D- Computertomografie, <http://www.phoenix-xray.com>, abgerufen am 6.6.2013.
- [31] Gourlay, C.M., Laukali H.I. and A.K. Dahle, Segregation Band formation in Al-Si Die Castings, Metallurgical and Materials Transactions 35A (2004), S. 2881-2891.
- [32] Bühler Druckguss AG, Schulungsprogramm: Formenentwicklung, Uzwil, CH.
- [33] Gössl, W., Untersuchung zur Kühlwirkung in Druckgussformen, Masterarbeit, Montanuniversität Leoben, 2011.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Schematische Darstellung einer horizontalen Kaltkammer-Druckgussmaschine [1].	4
Abbildung 2-2: Weg und Geschwindigkeit des Gießkolbens sowie Druckverlauf im Antriebszylinder einer Kaltkammermaschine während des Gießens, nach [2].	6
Abbildung 2-3: Schematische Darstellung der Schmelze in der Gießkammer mit steigenden Gießkolbengeschwindigkeiten v_k ($a < b < c$) [4].	7
Abbildung 2-4: Entstehung der konstitutionellen Unterkühlung vor der Erstarrungsfront [6].	9
Abbildung 2-5: Einfluss der konstitutionellen Unterkühlung auf die Erstarrungsmorphologie [6].	10
Abbildung 2-6: Typische Arten der Erstarrung: A ₁) exogen-glattwandig, A ₂) exogen-rauwandig, A ₃) exogen-schwammartig, B ₁) endogen-breitartig, B ₂) endogen-schalenbildend; a) fest, b) flüssig, c) Form [8].	11
Abbildung 2-7: Einfluss der Erstarrungsparameter auf die Gefügemorphologie und -feinheit [10].	12
Abbildung 2-8: Teilbereich des Al-Si-Phasendiagramms mit Gefügeschaubildern bei unterschiedlichen Si-Gehalten, nach [9].	15
Abbildung 2-9: Einteilung möglicher Gießfehler im Druckgießprozess.	16
Abbildung 2-10: LM, Ausschnitt eines Druckgussteils mit massiver Gasporosität [18].	18
Abbildung 2-11: LM, Kaltfließstelle in einem Druckgussteil [18].	18
Abbildung 2-12: LM, eingegossener Flitter (links) und eingegossene Spritzkugel (rechts) [18].	19
Abbildung 2-13: Temperaturabhängigkeit des spezifischen Volumens von Reinaluminium [6].	20
Abbildung 2-14: LM, Mikrolunker in einem Druckgussteil [18].	21

Abbildung 2-15: Schema über die Entstehung von Warmrissen a) Ausgangszustand: Körner umgeben von Eutektikum, b) durch Streckung des Gefüges bilden sich abgeschlossene Restschmelzebereiche, c) durch weitere Zugspannungen öffnet sich ein Riss [12].	22
Abbildung 2-16: Squeeze-Druck-Diagramm für verschiedene Squeeze-Pindurchmesser.	25
Abbildung 2-17: Schematische Darstellung des Druck-Zeit-Verlaufs der Gießkurve [23].	25
Abbildung 2-18: Auswirkungen des Squeeze-Drucks und der Verzögerung des Einfahrzeitpunkts auf die spezifische Dichte des Gussstücks [23].	26
Abbildung 3-1: Schematische Übersicht einer 3D-CT-Aufnahme (links), der Rekonstruktion des Volumenelements (Mitte) und der Visualisierung mit dem Ergebnis einer Fehleranalyse (rechts) [nach 30].	30
Abbildung 3-2: Übersicht des Prüfraums der CT-Anlage mit Detektor (Bild Mitte), eingespanntem Objekt am Drehtisch und Röntgenröhre (rechts) am ÖGI.	31
Abbildung 3-3: Lichtmikroskop mit PC-Einheit am ÖGI.	32
Abbildung 3-4: REM und PC-Einheit am Lehrstuhl für Gießereikunde.	33
Abbildung 3-5: Rotorentgasungsgerät zur Schmelzereinigung am ÖGI.	34
Abbildung 3-6: UDIP-Gerät am ÖGI.	35
Abbildung 3-7: Kaltkammer-Druckgießmaschine Bühler SC D/53 am ÖGI.	36
Abbildung 3-8: Aufnahme eines gesamten Abgusses.	37
Abbildung 3-9: Gesamtübersicht Lenkergehäuse mit Squeeze-Positionen SP1 und SP2.	38
Abbildung 3-10: Detailaufnahme SP1, eingezeichnete Lage der Schliffebene.	39
Abbildung 3-11: Gesamtübersicht GT1 mit eingezeichnetem Scanbereich und Schlifflage.	40
Abbildung 3-12: Gesamtübersicht GT 3, Position der Kernstifte und Schlifflagen 1 und 2.	41
Abbildung 4-1: CT, Probe 10-SP1, 2D Schichtaufnahme (Schnittebene A-A) mit möglichen Rissen und schematischem Squeeze-Pin.	44

Abbildung 4-2: CT, Probe 5-SP1 (links) und 11-SP1 (rechts), 3D-Modell mit Porositätsmapping.	45
Abbildung 4-3: LM, Übersichtsaufnahme Probe 1-SP1 mit eingezeichnetem Verdrängungsbereich (gelb) und Komprimierungszone unterhalb des Squeeze-Pins (rot); Positionen von Detail 1 und Detail 2.	47
Abbildung 4-4: LM, Probe 1-SP1, Detail 1, vergrößerte Ansicht des unbeeinflussten Bereichs mit Gefügebeschreibung.....	47
Abbildung 4-5: LM, Probe 1-SP1, Detail 2, vergrößerte Ansicht des verformten Bereichs mit eingezeichneter Verformungsrichtung.....	48
Abbildung 4-6: LM, Übersichtsaufnahme Probe 10-SP1 (links) und Probe 10-SP2 (rechts).....	49
Abbildung 4-7: LM, Übersichtsaufnahme Probe 11-SP1 (links) Probe 11-SP2 (rechts).	50
Abbildung 4-8: LM, Übersichtsaufnahme Probe 5-SP1, Porositätsmessung nach VDG P201 mit ROI.....	51
Abbildung 4-9: LM, Übersicht SP1-Proben (Schnitt A-A), Parametervariation Einfahrverzögerung (oben), Druck (Mitte) und Geschwindigkeit (unten); grün umrandet stellt den Standardparameter dar, weiße Markierungen zur Verdeutlichung des Einfahrweges.	53
Abbildung 4-10: Ergebnisse der visuellen Qualitätsbewertung der Zeitvariationen von SP1 (blau) und SP2 (rot), benotet nach Schulnotensystem (1-sehr gut, 5-ungenügend) und eingezeichnetem Standardparameter.....	54
Abbildung 4-11: Ergebnisse der visuellen Qualitätsbewertung der Systemdruckvariationen von SP1 (blau) und SP2 (rot), benotet nach Schulnotensystem (1-sehr gut, 5-ungenügend) und eingezeichnetem Standardparameter.	55
Abbildung 4-12: Ergebnisse der visuellen Qualitätsbewertung der Geschwindigkeitsvariationen von SP1 (blau) und SP2 (rot), benotet nach Schulnotensystem (1-sehr gut, 5-ungenügend) und eingezeichnetem Standardparameter.....	55
Abbildung 4-13: LM, Übersichtsaufnahme Probe 9-SP2, eingezeichneter ROI für quantitative Auswertung.	56

Abbildung 4-14: Ergebnis der quantitativen Fehlerauswertung der Druckvariationen von SP1.....	57
Abbildung 4-15: Ergebnis der quantitativen Fehlerauswertung der Druckvariationen von SP2.....	58
Abbildung 4-16: Schematische Auswertung mit Einzelwerten der quantitativen Auswertung von unterschiedlichen Squeeze-Drücken bei SP1.	59
Abbildung 4-17: LM, Übersichtsaufnahme Probe 12-SP2 (links) und 18-SP2 (rechts), unterschiedliches Fehleraufkommen in Abhängigkeit vom Squeeze-Druck (links: 60 bar, rechts: 160 bar).....	60
Abbildung 4-18: Links: LM, Probe 5-SP1, Übergang zum verformten Bereich (rote Markierung); Rechts: REM-EDX, Analyse Spektrum 1 und Spektrum 2, Flächenanalyse (orange Markierung).....	61
Abbildung 4-19: REM-EDX, Flächenanalyse, Probe 5-SP1, a) Überblick, b) Element Si, c) Cu und d) Fe	62
Abbildung 4-20: Zusammenhang Gefügebeurteilung (1: i.O., 2: akzeptabel, 3: nicht i.O.) und Einfahrtiefe mit Standardabweichung.	65
Abbildung 4-21: Zusammenhang zwischen Einfahrtiefe und Qualität der Squeeze-Bereiche von Nest 1.....	66
Abbildung 4-22: Zusammenhang zwischen Einfahrtiefe und Qualität der Squeeze-Bereiche von Nest 2.....	67
Abbildung 4-23: CT, GT 1.1, 3D-Modell mit Porositätsmapping.	68
Abbildung 4-24: CT, GT 1.2, Schichtbild von Reservoir und Bauteil (Schnitt A-A).....	68
Abbildung 4-25: CT, GT 1 (links) GT 2 (rechts), Vergleich nicht gesqueezezt und gesqueezezt (nachbearbeitet).....	69
Abbildung 4-26: CT, GT3, 3D-Modell mit Porositätsmapping.	70
Abbildung 4-27: LM, Squeeze-Reservoir mit Kennzeichnung der Verformungsrichtung.	71
Abbildung 4-28: LM, GT2 Probe 1.1, Überblick Squeeze-Bereich, verdichteter Bereich (gelb) mit Position Detail 1(links), vergrößerter Bereich mit Position Detail 2 (rechts).....	72

Abbildung 4-29: LM, GT2 Probe 1.1, Detail 1, vergrößerte Ansicht des verdichteten Bereichs mit Gefügebeschreibung.....	72
Abbildung 4-30: LM, GT2 Probe 1.1, Detail 2, vergrößerte Ansicht, Übergangsbereich unbeeinflusstes und verformtes Gefüge mit eingezeichneter Verformungsrichtung.....	73
Abbildung 4-31: LM, GT2 Probe 1.2, Überblick Squeeze-Bereich mit Lunker (rot markiert).....	74
Abbildung 4-32: LM, GT2 Probe 2.1 (links) und Probe 2.2 (rechts), Übersicht Squeeze-Bereiche, Fehlerbeschreibung und Position Detail 3 in Probe 2.2 (rechts).....	75
Abbildung 4-33: LM, GT2 Probe 2.2, Detail 3, vergrößerte Ansicht.	75
Abbildung 4-34: LM, GT3 Probe 1.1, Überblick gekühlter Bereich (Schnitt 1) mit schematisch eingezeichnetem Kernstift, Schlifflage (Bild links).	76
Abbildung 4-35: LM, GT3 Probe 1.1, Überblick gekühlter Bereich (Schnitt 2), Schlifflage (Bild links).	77
Abbildung 5-1: Schematische Darstellung des Testwerkzeuges mit Kernen und Squeeze-Positionen.	80
Abbildung 5-2: Schematische Darstellung eines Gussteils mit eingezeichneten Squeeze-Positionen und zu erwartendem Hot-Spot.	80
Abbildung 5-3: CAD 3D-Modell, Version 1, links: Geometrie der Doppelprobe; rechts: Längsschnitt durch einen Probenkörper ohne Überlauf.	81
Abbildung 5-4: Simulationsbild Erstarrung, Version 1, Probenkörper mit Position des zuletzt erstarrenden Bereichs (Hot-Spot).....	82
Abbildung 5-5: Simulationsbild Strömungsverlauf (Fill-Tracer), Version 1, gesamter Abguss mit durchgehendem Überlauf.	83
Abbildung 5-6: Simulationsbild Strömungsverlauf (Fill-Tracer), Version 1, vergrößerter Bereich eines Probenkörpers.	84
Abbildung 5-7: CAD 3D-Modell, Version 2, gesamter Abguss.....	85
Abbildung 5-8: Simulationsbild Erstarrung, Version 2, gesamter Abguss bei 6,8 Sek. Erstarrungszeit nach der Formfüllung.....	86

Abbildung 5-9: Simulationsbild Entlüftung, Version 2, gesamter Abguss mit Restluft-Verteilung (grau).	87
Abbildung 5-10: CAD 3D-Modell, Version 3, gesamter Abguss.....	88
Abbildung 5-11: Simulationsbild Erstarrung, Version 3, gesamter Abguss.	89
Abbildung 5-12: Simulationsbild Entlüftung, Version 3, gesamter Abguss mit Restluft-Verteilung (grau).	90
Abbildung 5-13: 3D-CAD Zeichnung der beweglichen Formhälfte mit je einem Kernzug pro Nest und Entlüftungsbahnen (kleines Bild).....	91
Abbildung 6-1: Bewegliche Formhälfte des Testwerkzeugs und Formeinsatz mit Entlüftungsbahnen (rechts unten); (1) tauschbarer Block mit den Ausnehmungen der Squeeze-Reservoirs, (2) Squeeze-Pin für indirektes Nachverdichten, (3) Stempel für direktes Nachverdichten, (4) kühlbare Kerne.....	93
Abbildung 6-2: Wärmebildaufnahmen der beweglichen Formhälfte mit Kernkühlung (oben) bzw. ohne Kernkühlung (unten).	95
Abbildung 6-3: Längsschnitt (links) und Querschnitt (rechts) durch einen Probenkörper.	96
Abbildung 6-4: LM, Übersicht des Hot-Spot-Bereichs eines Probenkörper 800 bar Nachdruck.....	97
Abbildung 8-1: Schema einer potentiellen Auswertung für die Abhängigkeit von Rissen und Porosität zu Squeezeparameter.	102

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Gießparameter-Varianten der Versuchsreihe.....	36
Tabelle 4-1: Auflistung der Parametervariationen: Standardparameter (fett), Einfahrzeitpunkt bzw. Squeezedauer (grün hinterlegt), Systemdruck (rot hinterlegt) und Geschwindigkeit (blau hinterlegt).....	42
Tabelle 4-2: Auflistung der Umrechnung des Systemdrucks auf den tatsächlichen Squeeze-Druck.....	43
Tabelle 4-3: Ergebnis einer quantitativen Porositäts- und Rissauswertung von SP1 des Standardparametersatzes.....	57
Tabelle 4-4: Ergebnisse der REM-EDX Analyse gesqueezter (Spektrum 1) und unbeeinflusster Bereich (Spektrum 2).....	63
Tabelle 4-5: Auszug von Daten der visuellen Gefügebeurteilung und Einfahrtiefe.	64
Tabelle 5-1: Verdrängungsvolumen des Squeeze-Pins bei unterschiedlichen Pin-Durchmessern.	92