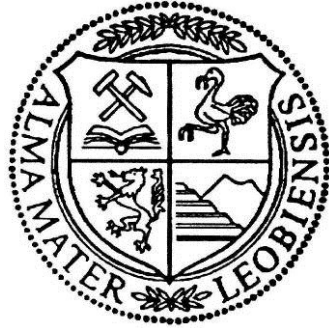


# Lehrstuhl für Gießereikunde

Department Metallurgie  
Montanuniversität Leoben



## **MASTERARBEIT**

KLASSIFIZIERUNG UND CHARAKTERISIERUNG VON VERFAHRENSBEDINGTEN  
GUSSFEHLERN IN EINEM INNOVATIVEN KOKILLEN-GIEßVERFAHREN

ANALYSIS AND CLASSIFICATION OF PROCESS-BASED CASTING DEFAULTS  
CAUSED BY AN INNOVATIVE GRAVITY DIE CASTING PROCESS

**Klaus-Peter Tucan**

Studienrichtung Metallurgie

Betreuer:

**Dr.-Ing. Timo Hanß, BMW**

**Univ. Prof. Dr. Peter Schumacher, MU Leoben**

Februar 2014

---

## Danksagung

Zuallererst bedanke ich mich bei Herrn Dr.-Ing. Timo Hanß für seine Betreuung und Unterstützung. Seine fachliche Kompetenz und unermüdliche Diskussionsbereitschaft haben sehr zu meiner persönlichen sowie fachlichen Entwicklung und zum Gelingen dieser Diplomarbeit beigetragen.

Mein zweiter Dank gilt Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing.Dr.phil. Peter Schumacher und dem Lehrstuhl für Gießereikunde für seine Betreuung seitens der Universität und für die Möglichkeit diese Diplomarbeit verfassen zu dürfen.

Weiters möchte ich mich bei den Mitarbeitern der BMW Group an den Standorten Landshut und München bedanken, insbesondere den Mitarbeitern der Labortechnik und den Gießereien. Ohne ihre Unterstützung wäre eine zeitgerechte Durchführung des praktischen Teils meiner Diplomarbeit nicht möglich gewesen.

Mein ganz besonderer Dank gilt meinen Eltern, die mir das Studium an der Montanuniversität Leoben ermöglichen.

Ich darf mich recht herzlich bei meinem Sohn Ferdinand und meiner Frau Melanie für ihr Verständnis und ihre liebevolle Unterstützung während der Erstellung der Diplomarbeit bedanken.

---

# Inhalt

<b>Danksagung</b> .....	<b>2</b>
<b>Inhalt</b> .....	<b>3</b>
<b>1 Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>5</b>
<b>2 Einleitung</b> .....	<b>6</b>
<b>3 Zielsetzung und Aufgabenstellung</b> .....	<b>8</b>
<b>4 Stand der Technik</b> .....	<b>9</b>
4.1 Kokillengießverfahren.....	9
4.2 Gießverfahren Injektor Casting (ICA) .....	9
4.3 Guss- und Gefügefehler aufgrund von Oxiden.....	13
4.3.1 Aluminiumoxid $Al_2O_3$ .....	13
4.3.2 Oxidbildungsmechanismen.....	14
4.3.3 Prozesstechnische Ursachen für Oxide .....	19
4.4 Bauteilschädigung durch Oxide.....	21
4.5 Schmelzereinheit.....	23
<b>5 Experimentelle Methoden</b> .....	<b>25</b>
5.1 Versuchsplan .....	25
5.2 Versuchsdurchführung .....	26
5.2.1 Versuchsteile .....	26
5.2.2 Zerstörungsfreie Prüfung .....	27
5.3 Auswerte- und Analyseverfahren .....	28
5.3.1 Dichtheitsprüfung.....	28
5.3.2 Zerstörende Prüfung.....	31
5.3.3 Visuelle Analyse .....	32
5.3.4 Computertomographie .....	33
5.3.5 Lichtmikroskopie .....	37
5.3.6 Rasterelektronenmikroskopie (REM) und energy dispersive X-ray spectroscopy (EDX) Analyse.....	38
5.3.7 Eigenresonanzmessung „Quasar PCRT“ .....	42
<b>6 Ergebnisse</b> .....	<b>48</b>
6.1 Teile-Aufbruch.....	49
6.1.1 Fehlerart 1 .....	49
6.1.2 Fehlerart 2 .....	50

---

6.1.3 Fehlerart 3 .....	53
6.2 REM / EDX.....	54
6.2.1 Fehlerart 1 .....	54
6.2.2 Fehlerart 2 .....	55
6.2.3 Fehlerart 3 .....	57
6.3 CT-Analysen .....	59
6.3.1 Fehlerart 1 .....	59
6.3.2 Fehlerart 2 .....	60
6.3.3 Fehlerart 3 .....	61
6.4 Metallographie.....	62
6.4.1 Fehlerart 1 .....	62
6.4.2 Fehlerart 2 .....	62
6.4.3 Fehlerart 3 .....	64
6.5 Zusammenfassung der Fehlerbilder.....	65
6.6 Statistische Auswertungen .....	66
6.6.1 Ergebnisse der Dichtheitsprüfung.....	66
6.6.2 Ergebnisse der Quasar-Prüfung .....	68
6.6.3 Zusammenhang von Fehlerhäufigkeit, Fehlerart und Fehlergröße .....	70
6.6.4 Zusammenhang von Fehlerhäufigkeit und Fehlerort .....	71
6.6.5 Rückschluss auf Gießparameter.....	72
<b>7 Simulation.....</b>	<b>74</b>
7.1.1 Strömungs- und Temperatursimulation.....	75
7.1.2 Fehlervorhersage.....	77
<b>8 Diskussion .....</b>	<b>80</b>
8.1.1 Fehlerart 1 „Altes Oxid“ .....	80
8.1.2 Fehlerart 2 „Gefaltete Oxidhaut“ .....	81
8.1.3 Fehlerart 3 „Kollabierte Gasblase“ .....	81
<b>9 Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>83</b>
<b>10 Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>85</b>
<b>11 Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>88</b>
<b>12 Literaturverzeichnis .....</b>	<b>89</b>
<b>13 Anhang.....</b>	<b>91</b>
13.1 Aufbruchliste ZK N63 .....	91
13.2 Aufbruchliste ZK N20 .....	97

---

# 1 Abkürzungsverzeichnis

DE	Dosiereinheit
ZK	Zylinderkopf
ICA	Injektor-Casting
SK	Schwerkraft-Kokillengießanlage Nummer
CT	Computertomographie / Computertomograph
REM	Rasterelektronenmikroskop
EDX	Energy Dispersive X-ray Spectroscopy
KLT	Kleinlast-Träger
PCRT	Process Compensation Resonance Test
HIP	Heißisostatisches Pressen

## 2 Einleitung

Die BMW Group hat zwischen 2006 und 2008 den CO<sub>2</sub>-Ausstoß der in Deutschland verkauften Fahrzeuge um 16 Prozent reduziert. Einer der Gründe für diese Reduzierung ist die Einführung der „EfficientDynamics“ Technologie, ein Paket von Einsparungspotentialen im Fahrzeug. Innovative Neuerungen wie z.B. Start-Stopp-Funktion, Bremsenergie-Rückgewinnung, Piezo-Common-Rail-Dieseleinspritzung, und Doppelaufladung sind Maßnahmen die dem Zwecke der Entwicklung umweltbewusster Fahrzeuge dienen. Die EfficientDynamics Technologie wird in allen Fahrzeugsegmenten eingesetzt und jedes Modell wird serienmäßig mit den umfangreichen Maßnahmen zur Verbrauchs- und Emissionsreduzierung ausgestattet. Der geringere Kraftstoffverbrauch geht in direkter Weise mit einer Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emission des Fahrzeuges einher. Möglich werden diese Einsparungen insbesondere durch eine Hubraumverringering bzw. Aufladung der Motoren. Es werden so Ladungswechselverluste vermindert und der Verbrauch bei gleicher Leistung reduziert.

Durch die Aufladung werden die Motoren lokal hohen thermischen und mechanischen Belastungen ausgesetzt. Besonders der Brennraumbereich des Zylinderkopfes wird bei aufgeladenen Motoren stärker thermisch belastet, als bei Motoren ohne Turbolader. Diese hochbelasteten Bereiche müssen in ihren metallurgischen Eigenschaften so verbessert werden, dass ein sicherer Einsatz des Bauteiles gewährleistet werden kann. Deshalb sollte bereits beim Gießvorgang eine Steigerung der thermomechanischen Werkstoffkennwerte erfolgen. Dies kann zum Beispiel durch ein feinkörniges Gefüge erreicht werden.

In der Leichtmetallgießerei der BMW Group in Landshut (D) wird ein neues innovatives Gießverfahren entwickelt, welches diesen Ansprüchen gerecht wird. Das Injector Casting (ICA) Verfahren ist ein speziell für hochbelastete Zylinderköpfe entwickeltes Gießverfahren, welches technologische und wirtschaftliche Vorteile miteinander verbindet. Eine unkonventionelle Formfüllung ermöglicht eine bessere Gussqualität und bessere Werkstoffkennwerte. Neben der Möglichkeit mit geringeren Gießtemperaturen zu gießen, führt eine optimierte Temperaturführung in der

---

Gussform zu höheren Abkühlgeschwindigkeiten und im Zuge dessen zu besseren metallurgischen Zuständen, wie einem feinkörnigeren Gefüge im Brennraumbereich.

Aufgrund des neuen Gießkonzeptes, bei dem der Einsatz von Gießfiltern nicht möglich ist, entstehen neue Fehlerbilder, die im Produktionsprozess zum Ausschuss des Bauteils führen können. Bisher gibt es keinen Aufschluss über den exakten Entstehungsmechanismus dieser Gussfehler.

### 3 Zielsetzung und Aufgabenstellung

BMW entwickelt in Landshut das Injektor-Casting Gießverfahren. Es wird an einer Schwerkraftkokillen-Gießanlage erprobt. Das Verfahren ermöglicht eine neue innovative Herstellung von Zylinderköpfen und wurde in der vorangehenden Entwicklungszeit als zielführend befunden. In der Vorentwicklungsphase wurde das Verfahren an zwei Zylinderköpfen erprobt. Es handelt sich hierbei um einen Vierzylinder Zylinderkopf (interne Bezeichnung N20) und einen V8-Zylinderkopf (interne Bezeichnung N63). Bei der Herstellung der Zylinderköpfe im ICA-Verfahren treten vermehrt verfahrensbedingte Fehlstellen auf. Bei Dichtheitsprüfungen sind die Gussteile im Bereich dieser Fehlstellen undicht.

Ziel dieser Diplomarbeit ist es die fehlerhaften Gussteile zu analysieren und die unterschiedlichen Fehlerbilder aufzuzeigen, zu klassifizieren und zu charakterisieren. Fehlermechanismen und mögliche Entstehungsursachen sollen aus den Fehlerbildern abgeleitet werden. Durch Kenntnis dieser Mechanismen soll ein Beitrag zur Fehlerbeseitigung im ICA-Verfahren geleistet werden.

Aus dieser Zielsetzung ergibt sich folgende Aufgabenstellung. Die Analyse der Fehlstellen der beiden Zylinderkopfarten soll in zerstörender und zerstörungsfreier Prüfung durchgeführt werden. Zur zerstörungsfreien Prüfung sollen Dichtheitsprüfung, sowie Computertomographie angewandt werden. Darüber hinaus soll geprüft werden in wie fern sich das Quasar-Prüfverfahren zur Detektion der Oxidfehler eignet. Dafür werden eine Anzahl Zylinderköpfe vom Typ N63 mit diesem Verfahren geprüft. Für die zerstörende Prüfung ist es notwendig die Teile mehrfach zu brechen und die Fehlstellen freizulegen. Die Analysen sind mit Hilfe der Labortechnik der BMW Group durchzuführen. Diese umfassen Rasterelektronenmikroskopie mit EDX Analyse, Stereo- und Lichtmikroskopie und Computertomographie mit Mikrofokus. Eine vergleichende Übersicht der Fehlerarten und ihren möglichen Entstehungsursachen, Rückschlüsse auf Prozessparameter und statistische Auswertungen sollen erstellt werden.

In der Simulation sollen Formfüllung, Temperaturführung und Oxidationsneigung während des Gießvorganges in Hinblick auf die Fehlerentstehung überprüft werden.



## 4 Stand der Technik

In der BMW Gießerei werden Zylinderköpfe mit dem Kokillengießverfahren unter Anderem durch Schwerkraftguss gefertigt. Für zukünftige Serien, angefangen mit dem neuen 4-Zylinder Zylinderkopf (interne Bezeichnung ZK NG-4NF), soll das neuentwickelte Gießverfahren „Injektor Casting“ angewandt werden.

### 4.1 Kokillengießverfahren

Abbildung 1 zeigt eine Einteilung der Gießverfahren. Die derzeitige Herstellmethode der Zylinderköpfe bei BMW ist das Schwerkraft-Kokillengießverfahren mit konventionellem Gießlöffel.

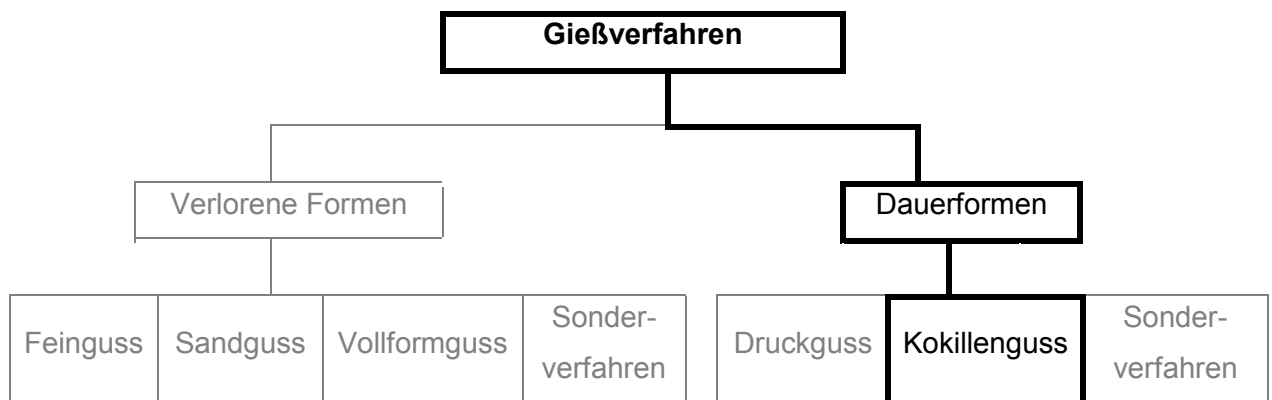


Abbildung 1: Einteilung der Gießverfahren

Beim Kokillengießen wird die Schmelze in den Formhohlraum der metallischen Dauerform, im Folgenden als Konturpaket bezeichnet, vergossen. Das Konturpaket ist mehrteilig aufgebaut und setzt sich aus einer Bodenplatte und beweglichen Seitenteile zusammen. Auf der Grundplatte sind Teile der Brennraumgeometrie abgebildet, zusammen mit den Konturen der Seitenteile bilden sie die Oberfläche des Gussteils. Die innere Geometrie wird durch das Einlegen von Sandkernpaketen in den Formhohlraum gebildet.

### 4.2 Gießverfahren Injektor Casting (ICA)

Beim „Injektor Casting“ handelt es sich um ein neues, innovatives Gießverfahren für hochbelastete Zylinderköpfe. Diese haben besonders im Bereich des Brennraums höchsten Belastungen standzuhalten. Um diese Anforderungen erfüllen zu können, müssen in diesem Bereich besonders hohe mechanische Eigenschaften im Guss

---

eingestellt werden. Der Hauptunterschied des ICA zum herkömmlichen Kokillenguss ist, dass die Befüllung von oben, ohne zusätzliches Anguss-System erfolgt. Der Brennraum ist hierbei der Bereich der als Erstes erstarren kann und nicht wie im herkömmlichen Verfahren bis zum Schluss mit heißer Schmelze umspült wird. Dieser Umstand und der Grund, dass durch das geänderte Erstarrungsverhalten des Gusses im ICA-Verfahren geringere Gießtemperaturen, bilden die Stärken dieses Verfahrens. Dies wirkt sich besonders in Bereichen hoher mechanischer und thermischer Beanspruchung, z.B. im Brennraumbereich des Zylinderkopfes (kurz ZK) aus. Beim ICA-Verfahren erfährt dieser Teil des Gussstücks die stärkste Kühlung, da im Gegensatz zum Seitenanguss keine heiße Schmelze mehr in diesen Bereich kommt, sobald der Badspiegel gestiegen ist.

Das Verfahren eignet sich aufgrund seiner baulichen Gegebenheiten besonders für den Einsatz beim Guss von Zylinderköpfen. Der Injektor befüllt die Kokille über die Speiseröffnungen im Deckkern, wo sich im fertigen ZK der Zündkerzenschacht befindet. Der Zylinderkopf wird von unten nach oben befüllt, wobei die Injektoren langsam während dem Füllvorgang aus der Kokille herausfahren. Die Schmelztemperatur kann aufgrund des umgedrehten Füllvorganges niedriger gehalten werden, da die bodennahen Bereiche nicht bis zum Ende des Füllvorganges heiß gehalten werden müssen. Diese geringere Gießtemperatur und die daraus resultierende kürzere Erstarrungszeit wirken sich positiv auf die Taktzeit aus, die sich dadurch verkürzt. Durch geringere Warmhaltetemperaturen der Schmelze und einen geringeren Kühlaufwand kann ebenso Energie gespart werden. Durch den Wegfall des Angussystems und einem geringeren Speiservolumen kann das anfallende Kreislaufmaterial um bis zu 40% reduziert werden. Eine Verringerung des Putzaufwands und geringere Werkzeugkosten durch den Entfall eines Einlasskerns, sind weitere Vorzüge des ICA-Verfahrens.

Die ICA-Gießanlage besteht aus den in Abbildung 2 1-7 gezeigten Hauptkomponenten zusammen. Ähnlich wie beim Schwerkraftguss wird in eine speziell für dieses Verfahren entwickelte Stahlkokille gegossen. Über ein Portal, welches die Aktuatorik für die Steuerung der Dosier-Einheit enthält, ist die Gießeinheit in jede Koordinatenrichtung frei beweglich. Die Gießeinheit, besteht aus Wanne, Verschluss-Stopfen und Injektor. Diese ist aus feuerfestem, thermisch stabilem Material gefertigt und kann deshalb bei der Befüllung direkt in die Schmelze getaucht werden. Durch absenken des Verschlussstopfens wird das Gießgefäß verschlossen. Die Gießeinheit fährt über das Portal zur Kokille, wo nach Einfahren ins Kernpaket durch Öffnen des Verschlussstopfens der Füllvorgang gestartet wird. Das Herausnehmen des Gussteiles übernimmt ein Entnahme-Roboter. Das neue Kernpaket wird mittels Kerngreifer in die Kokille eingelegt und die Gießeinheit fährt zurück in Grundstellung über den Ofen. Ein kompletter Gieß-Zyklus wird in Abbildung 3 dargestellt.

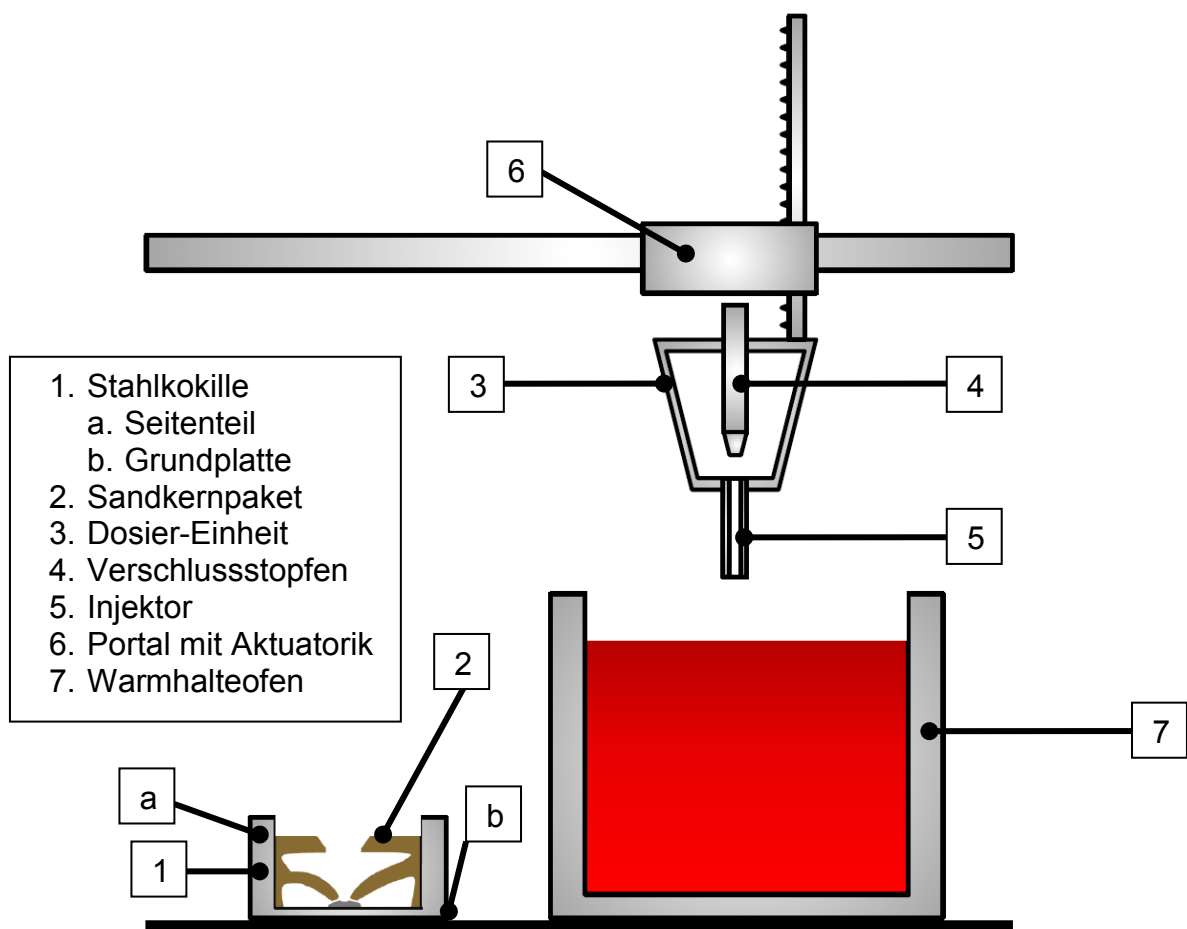


Abbildung 2: ICA-Verfahren

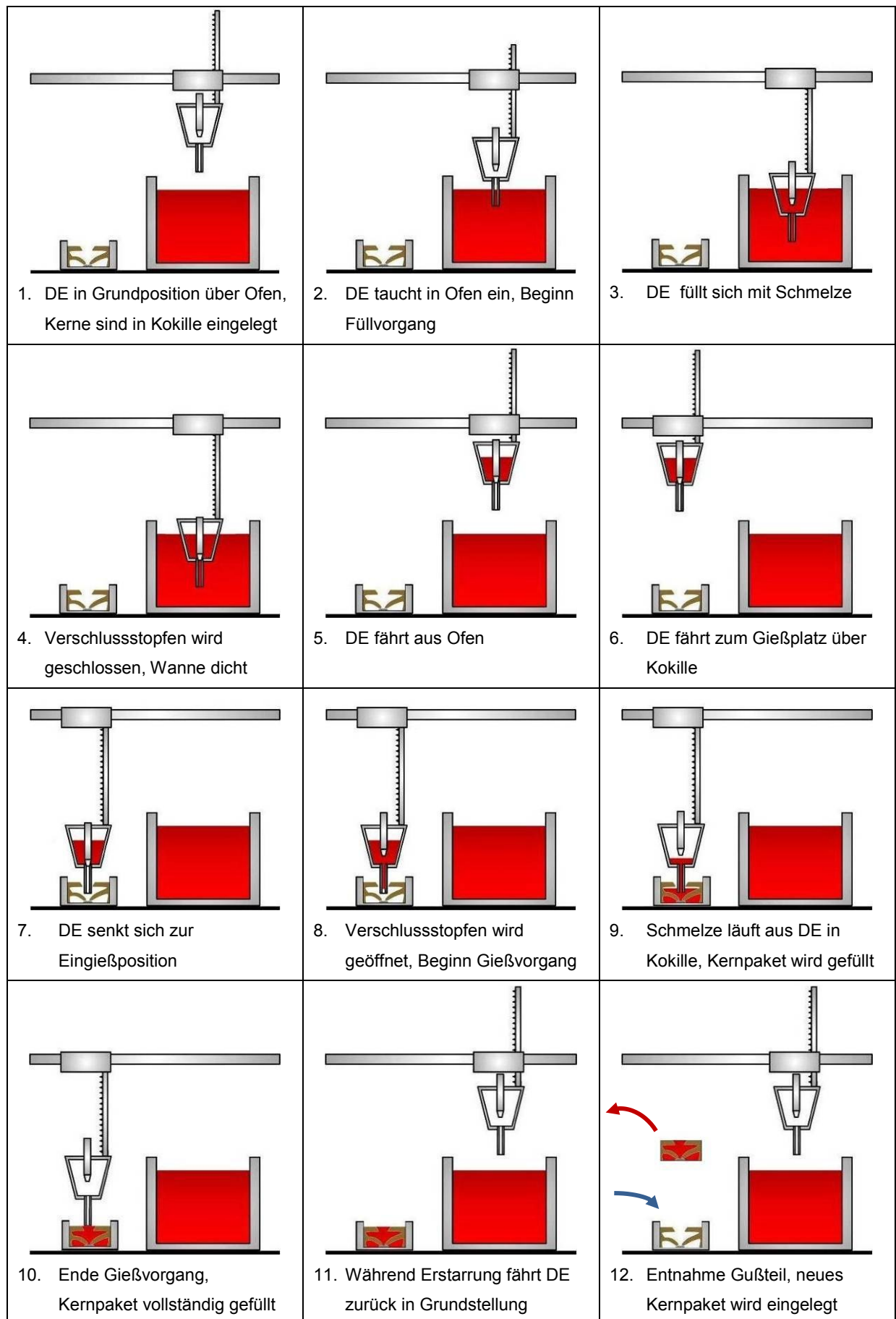


Abbildung 3: Nr. 1-12 Schema ICA

### 4.3 Guss- und Gefügefehler aufgrund von Oxiden

Mit dem Begriff „Oxid“ wird eine Verbindung von Sauerstoff mit einem anderen Element bezeichnet. Man unterscheidet hierbei zwischen sauren und basischen Oxiden. Betrachtet man die Oxide des Aluminiums, so ist neben Mischoxiden mit Si, Mg, Na und Sr, die bevorzugte Verbindung von Aluminium mit Sauerstoff das nichtmetallische Aluminiumoxid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Unabhängig vom Gießverfahren treten besonders im Aluminiumguss Oxideinschlüsse in Form von feinen Häutchen auf [1,2].

#### 4.3.1 Aluminiumoxid $\text{Al}_2\text{O}_3$

Bedingt durch die hohe Affinität des Aluminiums zum Sauerstoff kann eine Oxidation an der Oberfläche von Aluminiumschmelzen nicht vermieden werden. Es bildet sich Aluminiumoxid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), (auch Tonerde genannt), welches an Badoberflächen von Schmelzen als Pulver, Krätze oder Schaum vorhanden ist. Aufgrund der geringen Dichte kann in das Bad eingerührtes Aluminiumoxid nur sehr langsam hochsteigen und verschlacken bzw. auf den Boden absinken.

In Tabelle 1 befinden sich grundlegende Technische Daten zu Aluminiumoxid.

**Tabelle 1: Physikalische und chemische Daten  $\text{Al}_2\text{O}_3$  [1,3]**

Chemische Formel	$\text{Al}_2\text{O}_3$
Molmasse [g/mol]	101,96
Schmelzpunkt [°C]	2015
Siedepunkt [°C]	2980
Dichte [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]	3,64 - 4,02
Löslichkeit	Unlöslich in Wasser, schwer löslich in Säuren und Basen

Bei Aluminiumoxid muss zwischen der  $\alpha$ -Modifikation (Dichte  $3,96 - 4,02 \text{ g}/\text{cm}^3$ ) und der  $\gamma$ -Modifikation (Dichte  $3,64 - 3,96 \text{ g}/\text{cm}^3$ ) unterscheiden werden.  $\alpha$  entsteht aus  $\gamma$  unter großer Hitzeeinwirkung und Gegenwart wasserdampfreicher Atmosphäre. Die  $\alpha$ -Modifikation von  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , auch als Korund bekannt, wird in der Technik häufig eingesetzt, besonders aufgrund seiner hohen Härte und guten Feuerbeständigkeit. Die  $\alpha$ -Modifikation weist ein hartes Hexagonales Korundgitter auf, ist thermisch stabil und bildet sich erst ab Temperaturen ab  $750^\circ\text{C}$ . Die  $\gamma$ -Modifikation zeichnet

sich durch ein verzerrtes Spinellgitter aus und ist weich und thermisch instabil. Sie bildet sich bei Temperaturen bis 750°C [1, 2].

### 4.3.2 Oxidbildungsmechanismen

Im Gegensatz zu anderen flüssigen Medien bildet sich bei den meisten geschmolzenen Metallen an der Oberfläche eine Oxidschicht. Diese technisch wichtige Schicht kann sich beim Gießvorgang sowie bei der Erstarrung von Metallschmelzen sehr negativ auswirken. Werden, z.B. aufgrund von Turbulenzen beim Gießvorgang, Teile dieser Oxidschicht in die Schmelze eingeklappt oder eingezogen, kann dies im fertigen Guss zu schweren Fehlern führen, die zum Ausschuss führen [4].

Nach Campbell werden die Oxidfehler in zwei Kategorien eingeteilt. Er definiert „neue“ und „alte“ Oxide. Alte Oxide sind harte voluminöse Einschlüsse im Guss als die sich im bereits im Ofen, z.B. im Bereich zwischen Badoberfläche und Ofenwand, bilden. Neue Oxide entstehen während der Formfüllung und sind Oxidfilme, die im Guss in gefalteter Form als Fehler auftreten können.

Tabelle 2 zeigt einen Überblick über Größen und möglichen Entstehungsorte der genannten Oxidformen:

**Tabelle 2: Oxidformen [5]**

Entstehungsdauer	Dicke	Typ	Beschreibung	Mögl. Entstehungsquelle
0,01 - 1s	1nm - 1µm	Neu	Konfetti-ähnliches Fragment	Gießen, Formfüllung
10s bis 1min	10µm	Alt 1	Bewegliche, flächige Haut	Umgießpfanne
10min bis 1h	100µm	Alt 2	Dicke Haut, wenig beweglich	Schmelzofen
10h bis 10d	1000µm	Alt 3	Starrer Klumpen oder Platte	Warmhalteofen

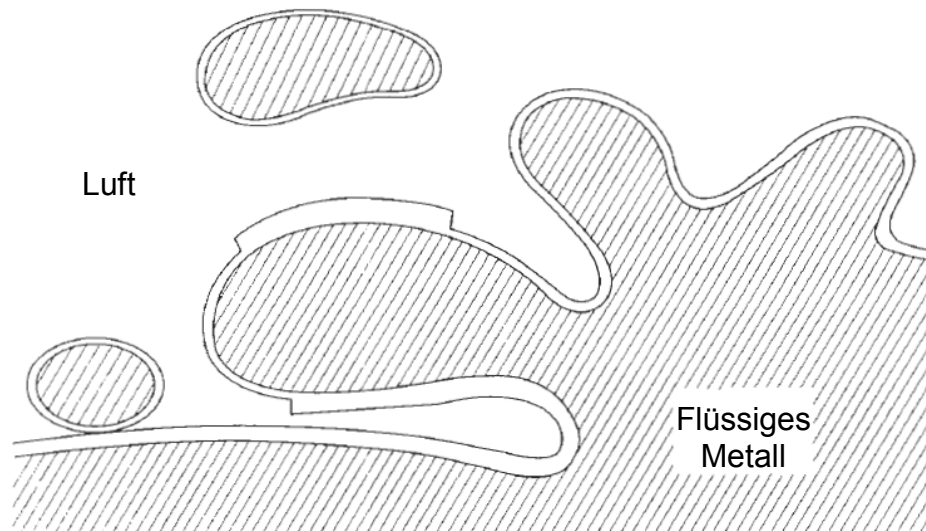
Die Entstehung von Oxiden verläuft nach Campbell in drei Phasen:

*Phase I.* Entstehung durch Einschluss aufgrund von Turbulenzen an der Oberfläche der Schmelze

*Phase II.* Mehrmaliges Einrollen und Falten der Oxidhaut

*Phase III.* Entfaltung und annehmen einer Richtung in der erstarrenden Schmelze

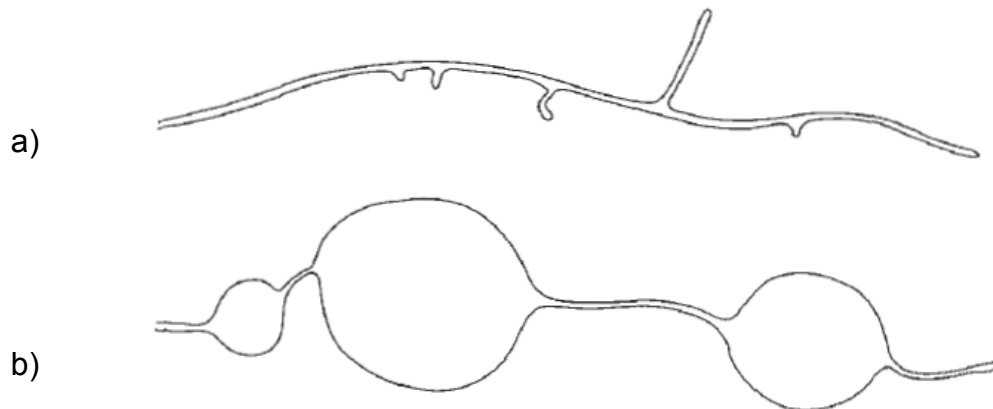
Während Phase I kann es aufgrund von Strömungsvorgängen in der Schmelze dazu kommen, dass ein Teil der oberflächlichen Oxidschicht in die Schmelze eingezogen wird, bzw. sich zwei Oberflächenabschnitte berühren. In dem in Abbildung 4 gezeigten Fall geht diese Faltung mit der Bildung einer doppelten Oxidhaut, auch engl. „bifilm“ bezeichnet, einher [4].



**Abbildung 4: Entstehung einer Oxidhaut durch Faltung [4]**

Es ist wichtig festzuhalten, dass die beiden ursprünglichen Oberflächenteile in der gefalteten Form aneinander liegen, jedoch nicht metallisch verbunden sind. Es bildet sich ein Spalt aus, der sich im erstarrten Guss als Riss äußern kann. Oberflächenturbulentes Gießen kann in der Schmelze daher schnell zur Bildung von Oxidhäuten führen und dementsprechend im Guss zu Rissen führen. Diese hochschmelzenden Oxidhäute können beim Erstarrungsvorgang im Bauteil eingeschlossen werden und bilden so eine Fehlstelle.

Das Aufbrechen bzw. Zerstören einer solchen Oxidhaut erweist sich als schwierig. Im Füllprozess kann die Oxidhaut mehrmals zerdrückt, geteilt und herumgewirbelt werden, sich in der Regel jedoch immer entfalten und neu ausrichten. Im günstigsten Fall können diese Störelemente während des Gießvorganges an die Oberfläche des Bauteils transportiert werden und dort erstarren. Bleiben diese im Guss, treten sie unter anderem als gefaltete Oxidhäute oder Blasen auf, dargestellt in Abbildung 5.

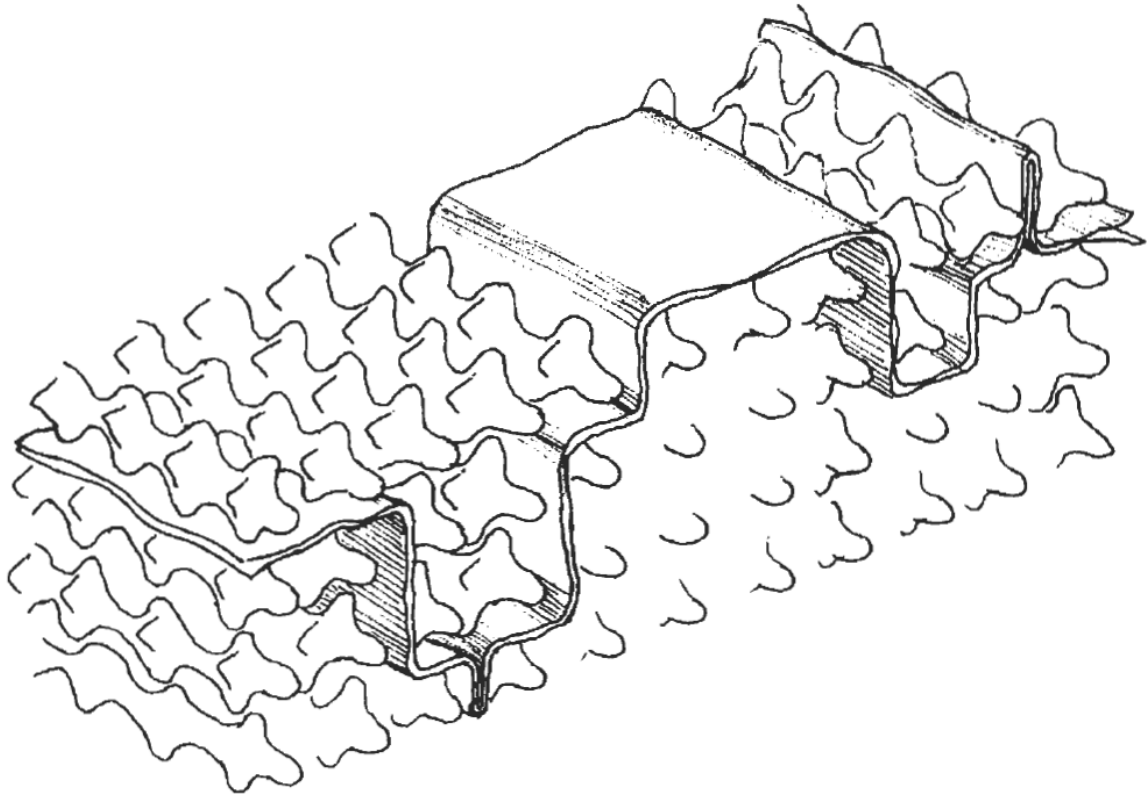


**Abbildung 5: Erscheinungsformen a) gefaltete Oxidhaut b) gefaltete Oxidhaut mit Luftblaseneinschlüssen [4]**

Während Phase II wird die bereits gefaltete Oxidhaut durch den Guss transportiert und aufgrund von strömungs- und geometriebedingten Einwirkungen weiter gefaltet und verformt. Zu diesem Zeitpunkt hat die Oxidhaut eine stark zerknüllte, vielfach gefaltete Form, hat jedoch ihren Riss-ähnlichen Charakter nicht verloren. Die Größe der Fehlstelle wird aufgrund dieser starken geometrischen Veränderung stark reduziert. Hierbei kann es bei starken Kühlraten dazu kommen, dass Phase III nicht erreicht wird und kleine Krätze ähnliche Fehlstellen im Guss gefunden werden.

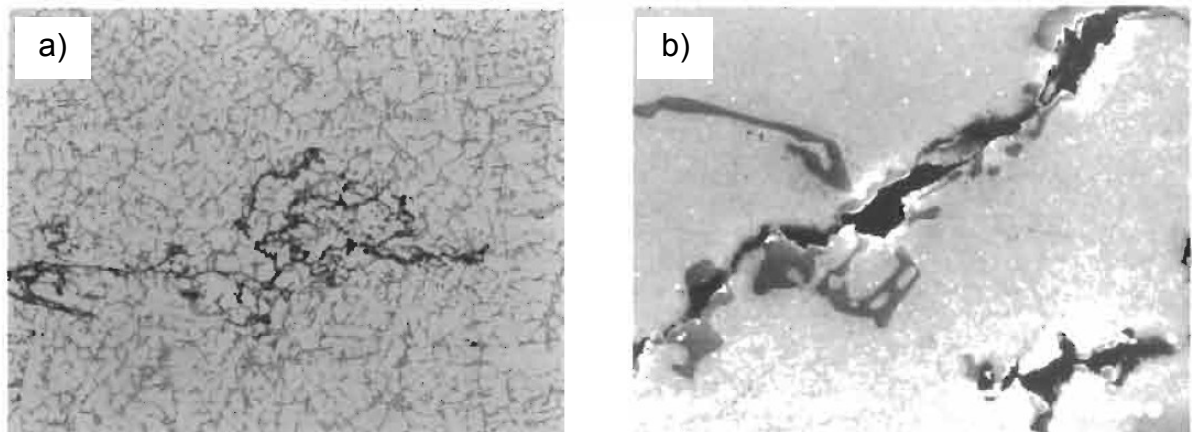
In Phase III, wenn der Gießvorgang abgeschlossen ist und die Schmelze sich in Ruhe befindet, kann sich die Oxidhaut wieder entfalten und sich während der Erstarrung im Bauteil positionieren. Beim Entfaltungsvorgang ist hier jedoch kein Aufklappen des „bifilms“ zu einer einzelnen Oxidhaut gemeint. Aufgrund von Bindungskräften zwischen den aufeinanderliegenden Hautflächen, sowie reibungsbedingten Vorgängen, ist die Oxidhaut bestrebt ihren gefalteten Zustand beizubehalten. Es handelt sich hierbei lediglich um ein entknüllen bzw. straffen dieser mehrfach verlegten und zerknitterten Fehlstelle. Das dendritische Wachstum unterstützt diesen Vorgang, indem die Oxidhaut in Richtung der Hauptdendritenachsen gezwungen wird. Abbildung 6 zeigt schematisch diesen Vorgang, bei dem sich eine Oxidhaut zwischen den Dendriten ausrichtet.





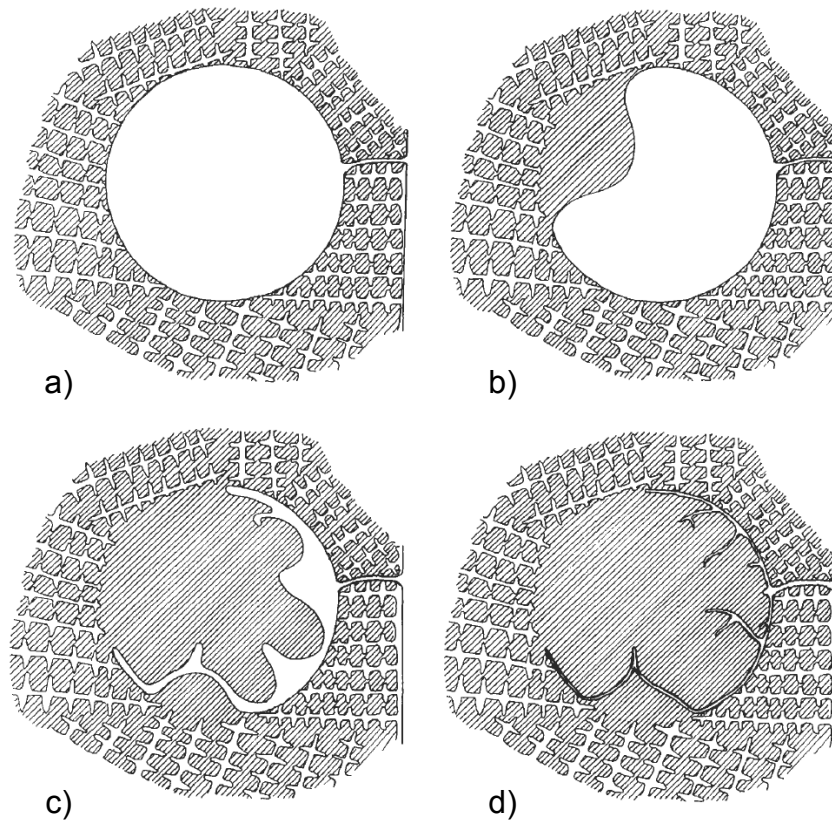
**Abbildung 6: Durch Dendriten gerichtete Oxidhaut [6]**

Dieser Effekt zeigt sich auch in Schlifffbildern, in denen Oxidhäute vorzugsweise entlang der Korngrenzen verlaufen.



**Abbildung 7: a) Oxidhaut in dendritischer Matrix b) Vergrößerung [8]**

Wird eine Blase in der Schmelze eingeschlossen besteht die Möglichkeit, dass diese durch Kontakt mit dem Äußeren der Schmelze während der Erstarrung langsam kollabiert und wiederum eine Oxidhaut zurücklässt. Diese Oxidhäute sind dicker, haben eine größere Längenausdehnung und eine Verbindung zum äußeren der Schmelze, dargestellt in Abbildung 8.



**Abbildung 8: Blasenzerfall und Oxidhaut [4]**

Befinden sich große Blasen im Guss, die während der Erstarrung an die Oberfläche gelangen, können im erstarrten Guss sogenannte „bubble trails“ [4], also kanalähnliche Oxide zurückbleiben. Das Zusammendrücken und Falten dieser Oxidhäute stellt einen charakteristischen wie auch irreversiblen Prozess für diese Form von Fehler dar.

Gute Gießsysteme und optimierte Bauteilgeometrien können diese Effekte mindern. Besonders raue Formwände und geometrische Hindernisse können Oxidanhaftungen begünstigen. Sind Oxidhäute eingeschlossen, so steigen oder sinken sie in der Schmelze, je nach Dichteunterschied zwischen Oxidhaut und Metall. Bei Kupferlegierungen wird die Oxidhaut aufsteigen wogegen sie bei Leichtmetallen wie Magnesium oder Lithium absinken wird. In Verbindung mit Aluminium wird sie aufgrund des geringen Dichteunterschiedes in Schwebelage. Der Dichteunterschied ist zwar vorhanden ( $\text{AlSi7Mg}$ :  $2,75\text{g/cm}^3$ ;  $\text{Al}_2\text{O}_3$ :  $\sim 3,9\text{g/cm}^3$ ), jedoch kann die in der Oxidhaut eingeschlossene Gase (Luft,  $\text{H}_2$ ) einen Ausgleich des Auftriebs bewirken [4].

### 4.3.3 Prozesstechnische Ursachen für Oxide

Besonders in der Gießereipraxis muss ein verstärktes Augenmerk auf das Hantieren mit der Schmelze in Hinblick auf die Vermeidung von Oxiden gelegt werden. Durch die große Affinität des Aluminiums zum Sauerstoff geht ein Kontakt mit Luft immer mit einer Oxidation der Schmelze einher. Die Vermeidung turbulenter Umfüllvorgänge, sowie ein ruhiges Pfannenfüllen und Gießen sind anzustreben. Hohe Haltetemperaturen und lange Haltedauern der Schmelze im Ofen begünstigen ebenfalls die Bildung von Oxiden. Wie stark eine Oxidation vor sich geht, steht in direkter Abhängigkeit von Druck, Konzentration, Temperatur und Zeit. Größtes Augenmerk gilt hierbei dem Schmelzen und Warmhalten des Metalls [2].

Um Oxideinschlüsse zu vermindern, sollte beim Gießen die Fallhöhe möglichst klein gehalten werden. Aus Abbildung 9 ist ersichtlich, dass im Fall *a* bei dem die Fallhöhe sehr gering gehalten wird, die Oxidschicht an der Oberfläche der Schmelze stabil und geschlossen bleibt. Im Fall *b*, im Bereich der kritischen Fallhöhe (ca. 12-16mm), bildet sich beim Eintritt des Strahls in das Bad ein Schlackenring. Wird, wie in Fall *c* gezeigt, die kritische Fallhöhe weit überschritten ( $> 90\text{mm}$ ), so kommt es zum Einziehen von Luft aufgrund turbulenter Füllung.

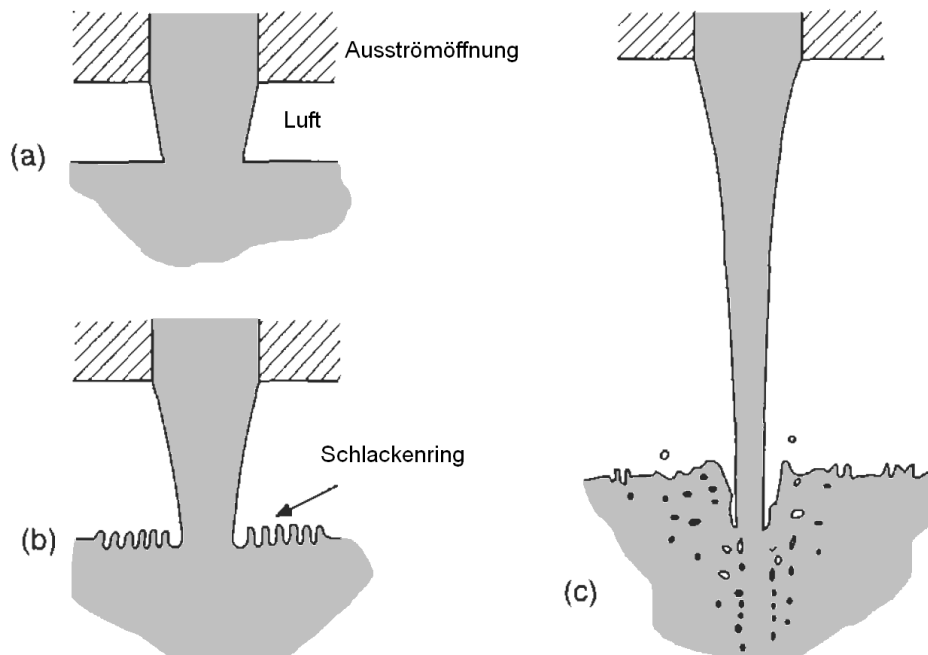


Abbildung 9: Effekt der kritischen Fallhöhe [8]

Für die Betrachtung der strömungstechnischen Gegebenheiten ist es wichtig die folgenden physikalischen bzw. strömungstechnischen Gegebenheiten zu berücksichtigen. Für den Ausfluss eines in die freie Umgebung strömenden Mediums sei nach *Toricelli* [9] die Strömungsgeschwindigkeit abhängig von der Höhe des Fluidspiegels  $h$  über der Auslassöffnung und der Schwerebeschleunigung  $g$ .

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$$

Des Weiteren sei die Weberzahl  $We$  [10] erwähnt, die als Maß für die Tropfenverformung gilt. Je größer sie ist, umso größer ist die Deformationswirkung der Anströmung für den Tropfen und umso weiter hat sich der Tropfen von der Kugelform entfernt. Sie setzt sich zusammen aus der Dichte  $\rho$ , dem Quadrat der Strömungsgeschwindigkeit  $v$ , der charakteristischen Länge  $L$  (z.B. Tropfenradius) und der Oberflächenspannung  $\sigma$ .

$$We = \frac{\rho \cdot v^2 \cdot L}{\sigma}$$

Um das Verhältnis von Trägheitskräften zu Schwerekräften innerhalb eines hydrodynamischen Systems darstellen zu können, wird die Froude-Zahl  $Fr$  [11] eingeführt. Sie ist eine der Koeffizienten der Navier-Stokes-Gleichung und setzt sich aus der charakteristischen Strömungsgeschwindigkeit  $v$ , der charakteristischen Länge  $L$  (z.B. Fallhöhe) und der Schwerebeschleunigung  $g$  zusammen.

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot L}}$$

Bezugnehmend auf die Strömungseigenschaften von offenen Gerinnen gilt:

- $Fr = 0$ : Ruhender Strömungszustand (Bsp.: See)
- $Fr < 1$ : Strömender Strömungszustand (Bsp.: Fluss)
- $Fr = 1$ : Grenzabfluss / kritischer Abfluss (Bsp.: Überströmung eines Wehres)
- $Fr > 1$ : Schießender Strömungszustand (Bsp.: Gebirgsbach)

In der Gießereipraxis wird von einer kritischen Strömungsgeschwindigkeit  $v_{krit}$  von 0,5 m/s für Kokillengießverfahren ausgegangen.

#### 4.4 Bauteilschädigung durch Oxide

Aufgrund der Art und Weise wie Oxidhäute in Bauteilen vorkommen können, liegt nahe, dass diese Ausgangspunkte für Bauteilschäden, besonders unter dynamischer Beanspruchung. Im direkten Vergleich zur Bauteilschädigung durch Poren zeigt sich jedoch, dass bei gleicher Fehlergröße, Poren für die zyklische Belastbarkeit von Bauteilen schädlicher sind als Oxide. Eine Abschätzung liefert Abbildung 10.

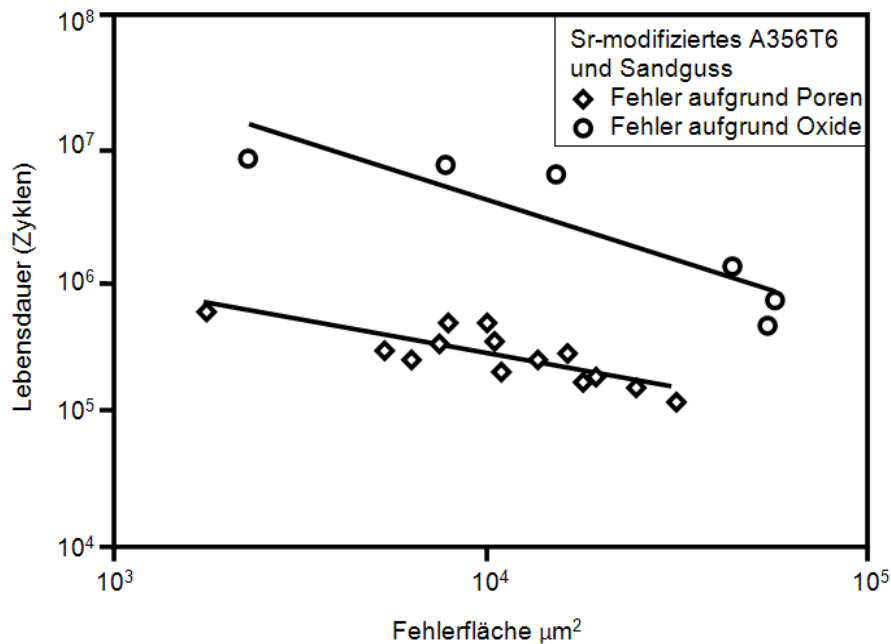


Abbildung 10: Bauteilschädigung in Abhängigkeit von der Fehlergröße [12]

Einer der Gründe dafür, warum Oxidhäute im mechanischen Belastungsfall eine geringere Gefahr darstellen als Poren, ist der Umstand, dass Oxidhäute teilweise direkt an die Aluminium-Matrix gebunden sind. Dies stellt eine Reduzierung der Spannungen in diesen Bereichen dar, was jedoch nur auf nicht gefaltete Oxidhäute zutrifft. Die gefalteten Oxidhäute („bifilm“) sind nicht aneinander gebunden [4, 12].

Oxide können im Guss zur Bauteilschädigung aufgrund von Undichtheit führen. Bei geringen Bauteildicken können sie Durchgänge in dünnen Wänden abbilden, was besonders bei druckbeanspruchten Bauteilen problematisch sein kann.

Abbildung 11 zeigt das Verhältnis von Poren zu Oxiden als Initiale für Fehler im Bauteil.

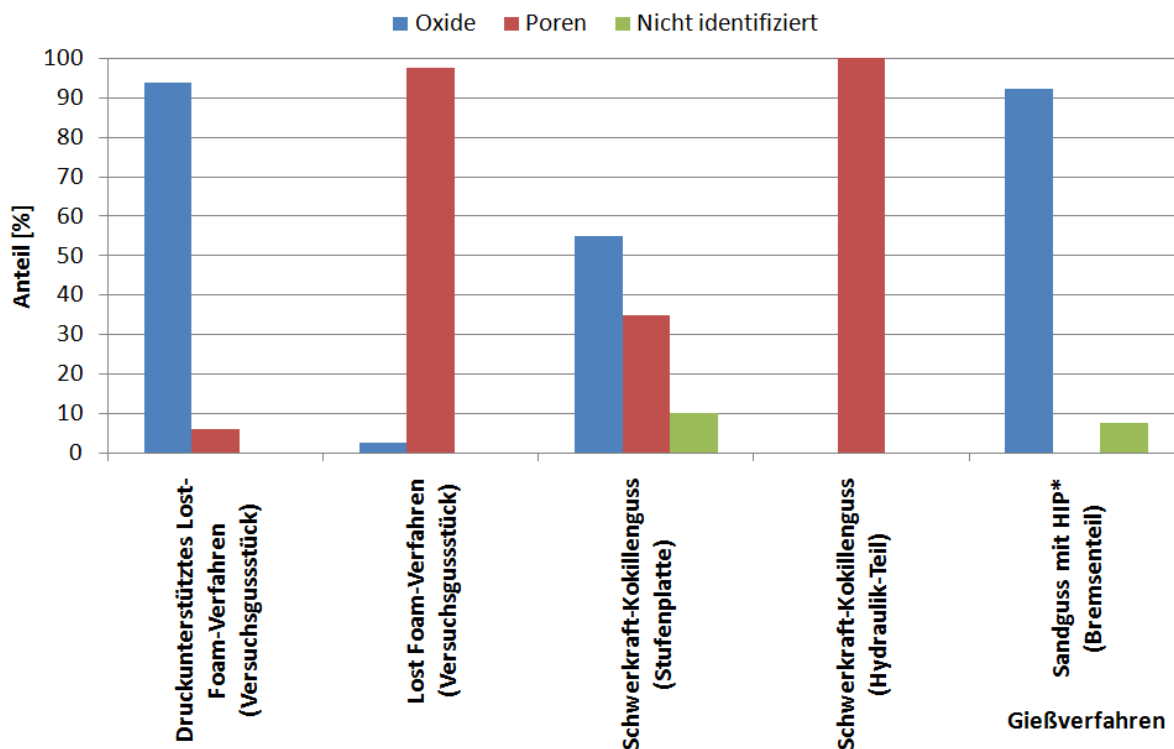


Abbildung 11: Anzahl der für Ermüdungsschädigung verantwortlichen Gussfehler in Abhängigkeit vom Gießverfahren [12]

Die unterschiedlichen Gießverfahren und Bauteilgeometrien begünstigen jeweils andere Fehlerbilder. So wird z.B. beim Lost-Foam-Gießverfahren aufgrund der Verdampfung des Polystyrols in annähernd einhundert Prozent der Fälle zu Gasporositäten.

Im Gegensatz dazu bilden sich bei anderen Gießverfahren eher Oxidfehler als Poren. Im Schwerkraft-Kokillenguss stellt sich bei dünnwandigen Bauteilen, wie Platten, ein ausgewogenes Bild ein. Komplexe Bauteile neigen aufgrund der Möglichkeit eines schlechteren Speisungsverhaltens und größerer Temperaturdifferenzen im Gussteil, eher zu Porositäten [12].

## 4.5 Schmelzereinheit

Ein wichtiger Faktor in Hinblick auf die Vermeidung von Oxiden im Gussstück ist die Schmelzereinheit. Hierbei kann bereits bei der Vorbereitung der Schmelze für den Guss eine mögliche Bildung von Oxiden eingedämmt bzw. vermieden werden. Das Vormaterial wird teils in Masseln und Barren, oder aber als Kreislaufmaterial (Angüsse, Steiger, Fehlgüsse,...) in Tiegel-, Herd- und Drehtrommelöfen geschmolzen. Beim Aufschmelzen des Materials bildet sich eine zähe Oxidschicht, die aufgrund des Dichteunterschiedes auf der Badoberfläche aufschwimmt. Durch Turbulenz kann diese Oxidschicht in die Schmelze eingezogen werden (Gefahr besonders bei Drehtrommelöfen). Bei Herdöfen kann diese Schicht durch Abschmelzbrücken bzw. das Aufschmelzen in Vorherden vom restlichen Material getrennt gehalten werden. In der Schmelze schwebende Verunreinigungen treiben beim Abstehen der Schmelze an die Oberfläche und werden periodisch als *Krätze* abgezogen. Nicht sauber gehaltene Öfen geben Oxiden die Möglichkeit zum Kristallisieren und es bilden sich Ablagerungen z.B. aus Korund ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), dargestellt in Abbildung 12. Schmelzetemperaturen von  $700^\circ\text{C}$  im Ofen mit normalem Luftzutritt führen nach 25 h zur Korundkeim-Bildung, bei  $800^\circ\text{C}$  geschieht dies bereits nach 7 h. Damit keine harten Einschlüsse in die Schmelze entstehen, sollten die Reinigungsintervalle kürzer sein.

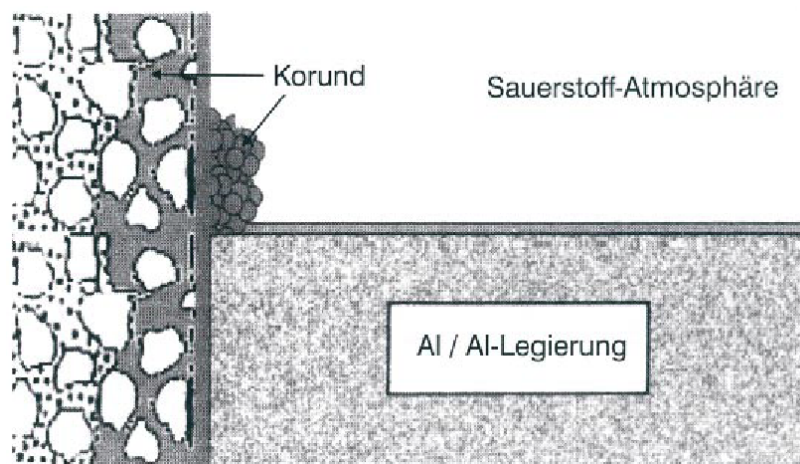
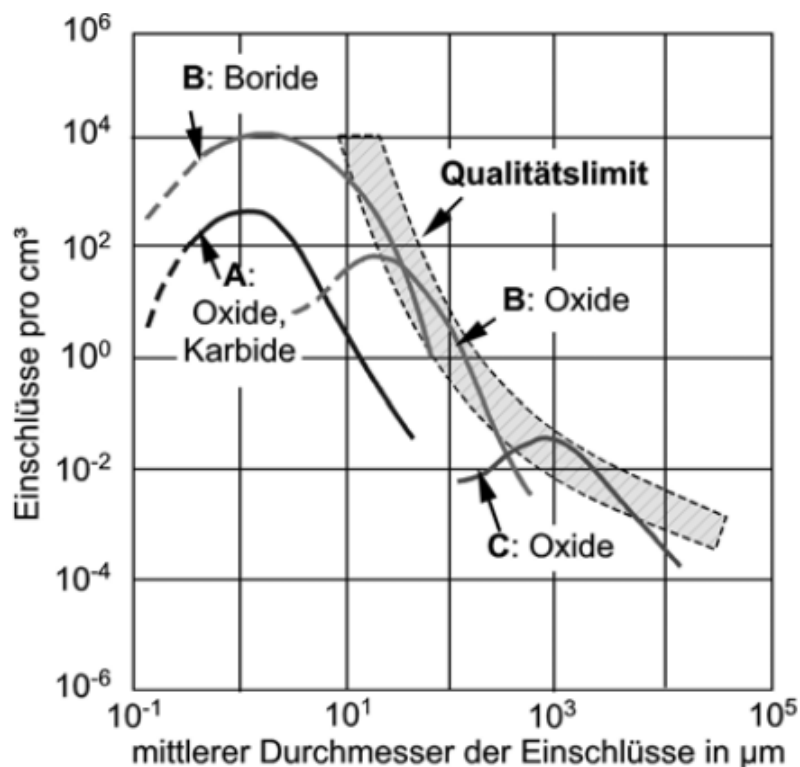


Abbildung 12: Korund-Ablagerungen an einer Ofenwand [13]

Eine früher gängige Art der Schmelzereinigung war die Behandlung mit Chlorgas, welche jedoch aus Umweltschutzgründen nicht mehr angewendet wird. Als Ersatz für diesen Spülvorgang dienen heute Spül- oder Inertgase wie Stickstoff und Argon.

Diese Spüleinigungen, sowie das mehrstündige Abstehen der Schmelze in Warmhalte- und Gießöfen, bei dem leichte Partikel an die Oberfläche treiben und sich Schwerere am Boden sammeln, können einen großen Beitrag zur Schmelzereinigung leisten. Weitere Abhilfen schaffen Durchlauffilter, die meist aus porösen Keramiken bestehen und Teilchen während des Gießvorgangs aus der Schmelze filtern.

In Abbildung 13 ist die Größenverteilung der aus der Schmelze stammenden Einschlüsse dargestellt. Der grau schraffierte Bereich zeigt die Qualitätsgrenze in der Einschlüsse im Hinblick auf das fertige Gussstück tolerierbar sind. Hierbei handelt es sich bei Typ „A“ um Einschlüsse aus der Elektrolyse, bei Typ „B“ um Einschlüsse durch Kornfeinen und Schmelzebehandlung beim Schmelzen und bei Typ „C“: Einschlüsse durch Fehler bei der Schmelzezufuhr beim Strangguss.



**Abbildung 13: Qualitätsgrenze für Einschlüsse von Oxiden, Boriden und Karbiden in Aluminiumguß [14]**



## 5 Experimentelle Methoden

### 5.1 Versuchsplan

Der Versuchsplan zeigt schematisch den Ablauf der Analysen und Tests, die im Zuge dieser Diplomarbeit durchgeführt wurden. Die Hauptbereiche gliedern sich in die Bereiche Gießversuche und Simulation, sowie die anschließende Diskussion der Ergebnisse.

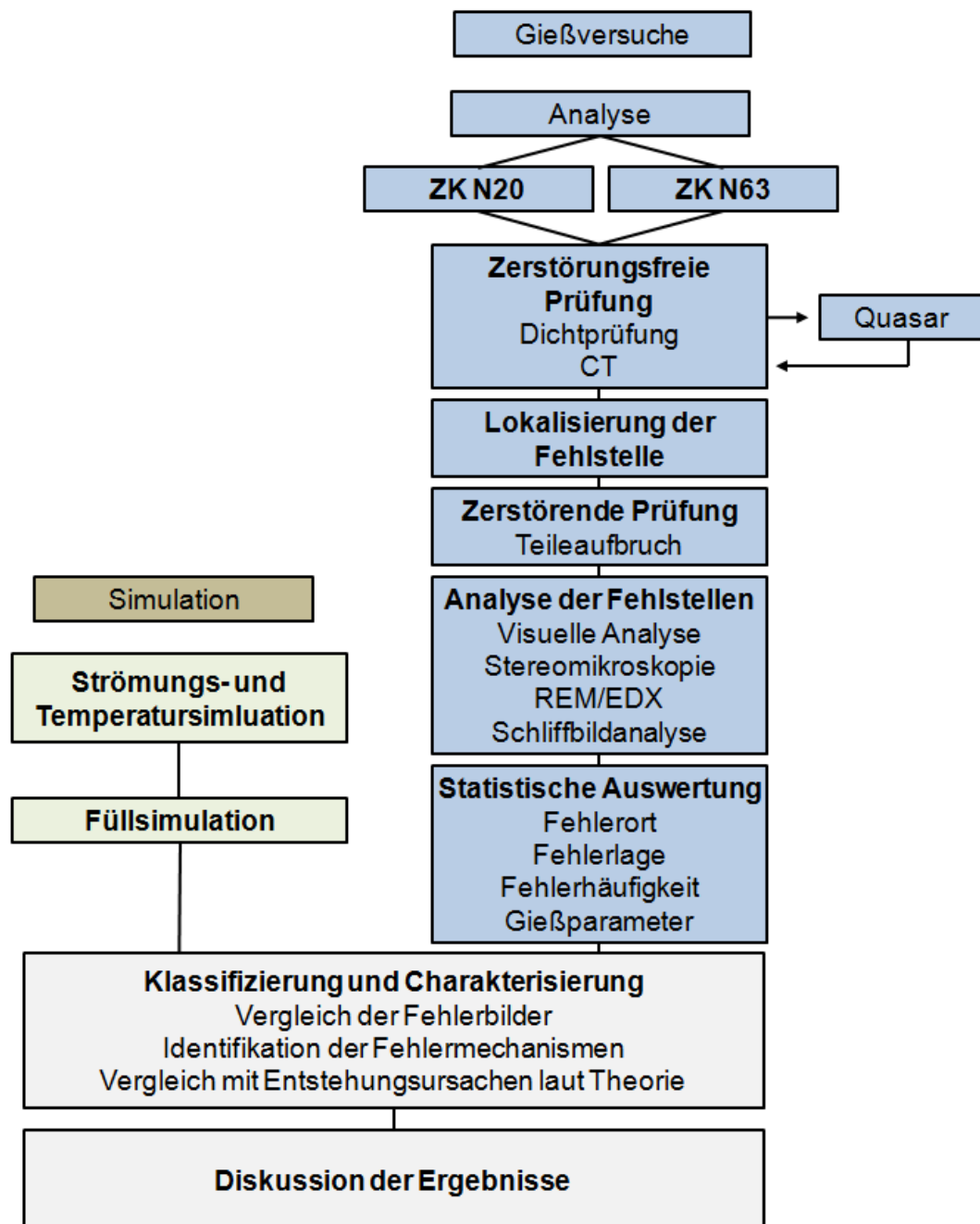


Abbildung 14: Versuchsplan

## 5.2 Versuchsdurchführung

### 5.2.1 Versuchsteile

Im Bereich des Brennraumes werden hohe mechanische Kennwerte gefordert. Besonders in Hinblick auf die Entwicklung von neuen turbogeladenen Motorkonzepten gehen die Entwicklungen in Richtung von Gießverfahren die ein feinkörniges Gefüge mittels starker Kühlung in diesen Bereichen möglich machen. Einerseits kann dies durch die Wahl eines geeigneten Werkstoffs und optimale Wärmebehandlung beeinflusst werden. Auf der anderen Seite wird aufgrund einer gezielten Kühlung der Dendritenarmabstand (DAS) verkleinert und somit die mechanischen Eigenschaften verbessert. Die im Zuge dieser Diplomarbeit mit dem ICA-Gießverfahren gegossenen, und für die Behandlung der Oxidbildungsproblematik herangezogenen Zylinderköpfe tragen die BMW-interne Bezeichnung N20 und N63 dargestellt in Abbildung 15 und 16. Beim N20 handelt sich um einen Zylinderkopf für die Herstellung der künftigen Generation des turbogeladenen BMW Vierzylinder-Ottomotors. Der ZK N63 wird Teil von V8-Turbo-Motoren.

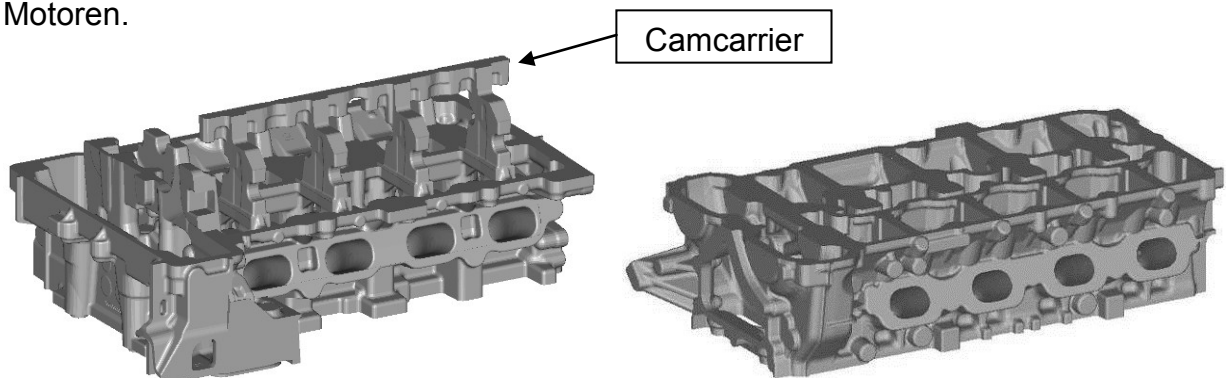


Abbildung 15: Zylinderkopf N20

Abbildung 16: Zylinderkopf N63

Nach dem Abguss mit dem ICA-Verfahren und der Rohteilbearbeitung, bei der die Speiser abgesägt werden, liegen die Zylinderköpfe in der gezeigten Form vor. Abgesehen von Sandanlagerungen in den Kanälen, sowie im Deck- bzw. Ölraumbereich sind lediglich die Speiser als überschüssiges Material vom Grundteil abzutrennen.

Der ZK N63 weist gegenüber dem ZK N20 eine größere Länge auf und der Nockenwellenhalter (engl. camcarrier) wird nicht mit gegossen. Weiters unterscheiden sich die beiden ZK abgesehen von leichten Konturunterschieden im späteren Einsatz in unterschiedlichen Motorarten. Wie beim Kokillengießverfahren

üblich werden Hohlräume und Aussparungen mit Sandkernen, die äußeren Konturen durch die Kokillenwände abgebildet. Die Gießversuche mit dem ICA Verfahren wurden auf einer Schwerkraftkokillengießanlage durchgeführt. Ziel der Gießreihen war es, die Abläufe zu optimieren bzw. prozesssicher zu machen und des Weiteren Fehler im fertigen Guss zu analysieren und zu reduzieren.

### 5.2.2 Zerstörungsfreie Prüfung

Vom Gießen bis zur Auslieferung des Bauteils werden diverse Prüfungen zur Sicherung der Bauteilqualität und der Gewährleistung eines fehlerfreien Bauteils durchgeführt. Die in Tabelle 3 aufgelisteten Prüfverfahren und dadurch detektierbaren Fehler bilden den Anfang dieser Kette an Qualitätsmechanismen.

Tabelle 3: Prüfverfahren und mögliche Fehler

Prüfverfahren	Mögliche Fehler
CT-Prüfung	Lunker, Poren, Gasblasen, Einschlüsse
Dichtheitsprüfung	Undichtheiten aufgrund von Fehlguss oder Einschlüssen
Quasar	Oxide, Lunker, Poren, Gasblasen, Einschlüsse

### Nomenklatur der Fehlerlagen

An dem in Abbildung 17 gezeigten Zylinderkopf und dem angestellten Schema wird die in den folgenden Diagrammen verwendete Zuordnung erläutert. Der am Kettenkasten angrenzende Zylinder trägt die Nummer 1, die weiteren Zylinder werden in Richtung Kupplung aufsteigend nummeriert. Die Ein- und Auslasskanäle sind mit 1 und 2 bezeichnet, wobei der Kanal 1 immer der dem Kettenkasten näher gelegene ist. Er wird in weiterer Folge auch abgekürzt mit links bezeichnet, der Kanal 2 mit rechts. Die Wand zwischen den beiden Kanälen wird als Mitte betitelt.

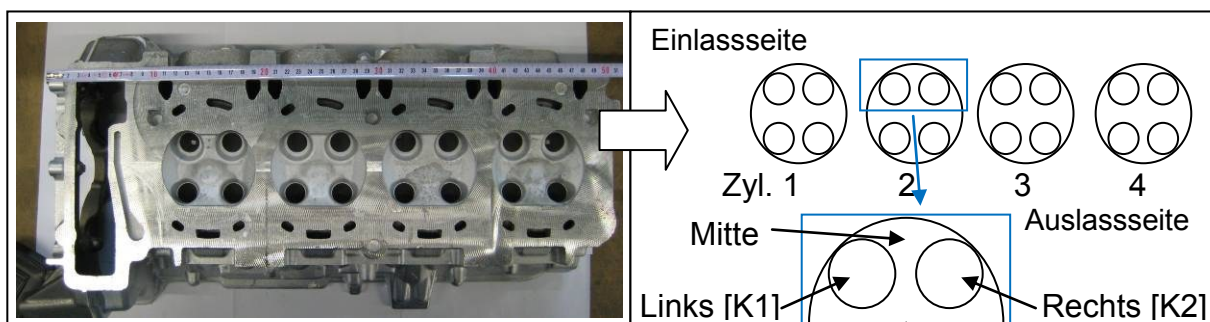
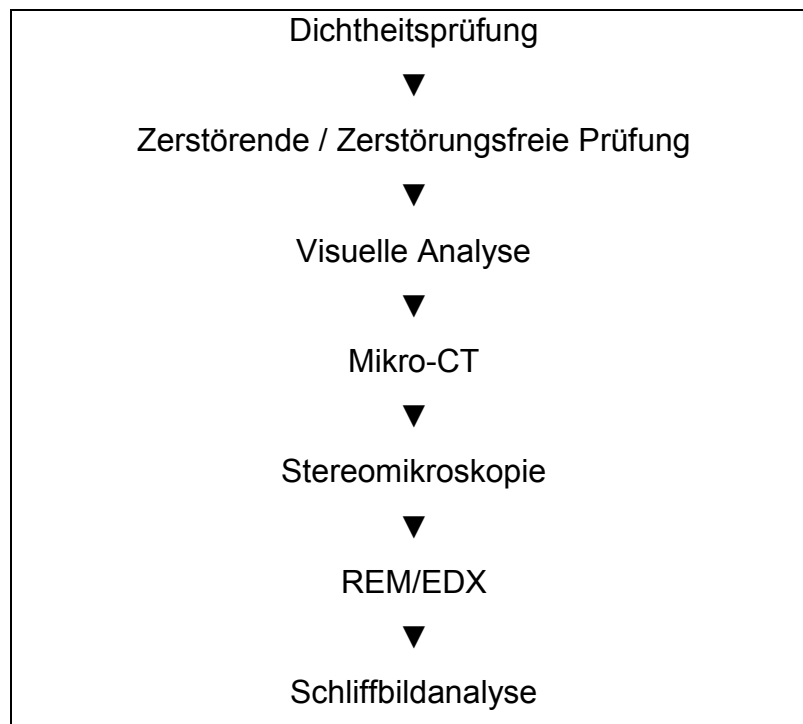


Abbildung 17: Lagebestimmung Zylinder Nummern und Kanäle ZK N63

### 5.3 Auswerte- und Analyseverfahren

Das Auffinden der Fehlstellen und die Analyse der Bruchflächen sowie der gefundenen Fehlerbilder umfassen folgende Schritte:



#### 5.3.1 Dichtheitsprüfung

Bei BMW werden zwei unterschiedliche Dichtprüfmethoden angewandt:

- Dichtheitsprüfung im Wasserbecken (ZK N63 und ZK N20)
- Differenzdruckprüfung (ZK N63)

Die Dichtheitsprüfung im Wasserbad, schematisch dargestellt in Abbildung 18, wird zur Lokalisierung der Fehlstellen im Guss verwendet. Hierbei wird das Prüfobjekt in ein Wasserbecken vollständig eingetaucht. Wassermantel und Ölraum werden mit Drücken von 2-6 bar beaufschlagt. Befindet sich in einem der Bereiche aufgrund von Gießfehlern ein Durchgang durch die Gussteilwand, so kann der Fehler aufgrund der an dieser Stelle aufsteigenden Luftblasen im Wasserbad gefunden werden. Die Stelle wird für etwaige zerstörende Prüfungen markiert und das Teil wird als undicht gekennzeichnet. (Für die Prüfung des ZK N20 stand keine Differenzdruckprüfanlage zur Verfügung.)

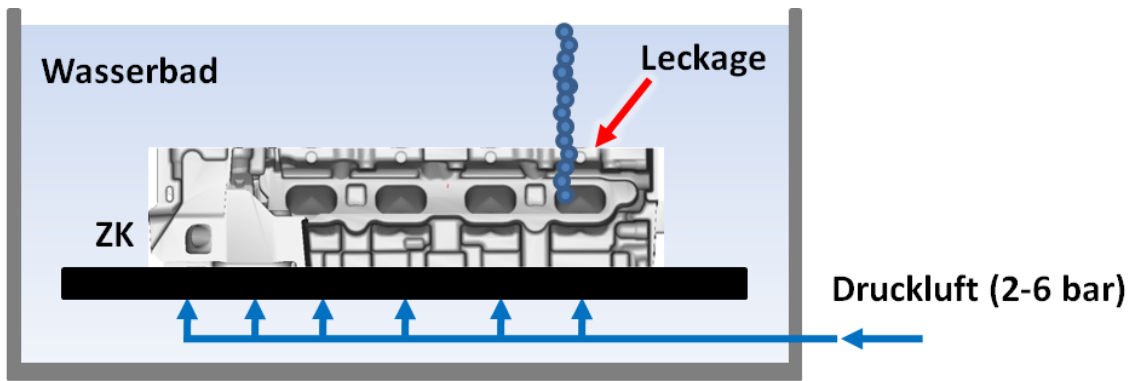


Abbildung 18: Schema der Dichtheitsprüfung

Die Differenzdruck-Prüfung dargestellt in Abbildung 20 funktioniert ähnlich wie die Dichtheitsprüfung im Wasserbecken, jedoch ohne Wasser und ist in einer Linienfertigung einfacher realisierbar. Das Prüfteil wird während der Prüfung ebenfalls mit Druck beaufschlagt. Nach einer kurzen Beruhigungszeit wird ein Ventil geschlossen und das Teil von der Druckluftversorgung getrennt. Nach Ablauf einer gewissen Halte- bzw. Messzeit wird der Differenzdruck gemessen. Existiert ein Leck, so kann der Druck nicht aufrecht gehalten werden und ein Druckverlust kann festgestellt werden. Bei diesem Prüfverfahren wird keine Lokalisierung der undichten Stelle vorgenommen, das Teil wird lediglich als undicht markiert und aus der Produktionslinie ausgeschleust. Für die Prüfung des ZK N63 stand eine solche Differenzdruckprüfanlage zur Verfügung.

Zur genauen Lokalisierung der Fehlstellen wurde der Zylinderkopf in die Bereiche Einlass- bzw. Auslassseite und den jeweiligen Zylindernummern mit den Zugehörigen Kanalnummern eingeteilt.

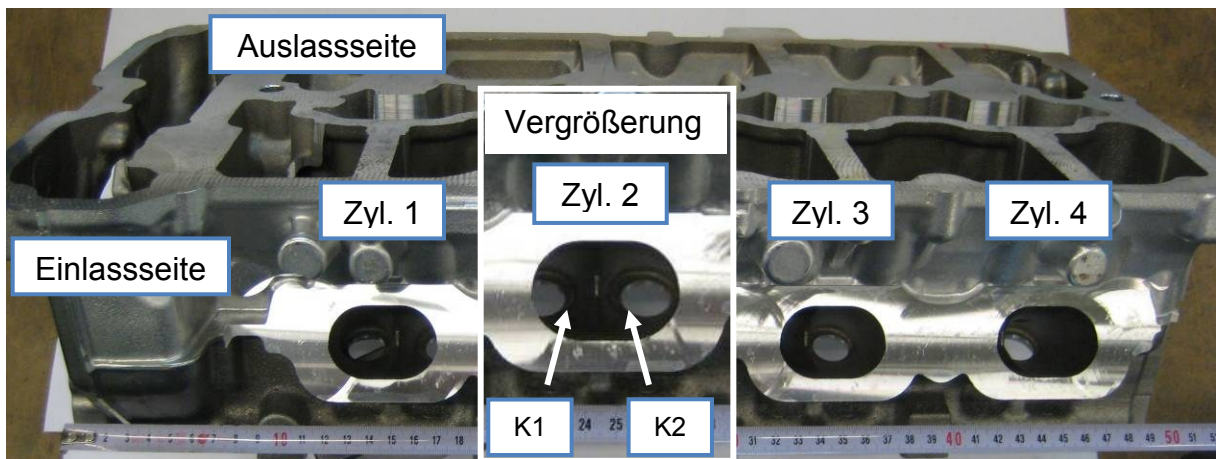


Abbildung 19: Benennung der Bereiche des ZK für Zuordnung der Fehlstellen

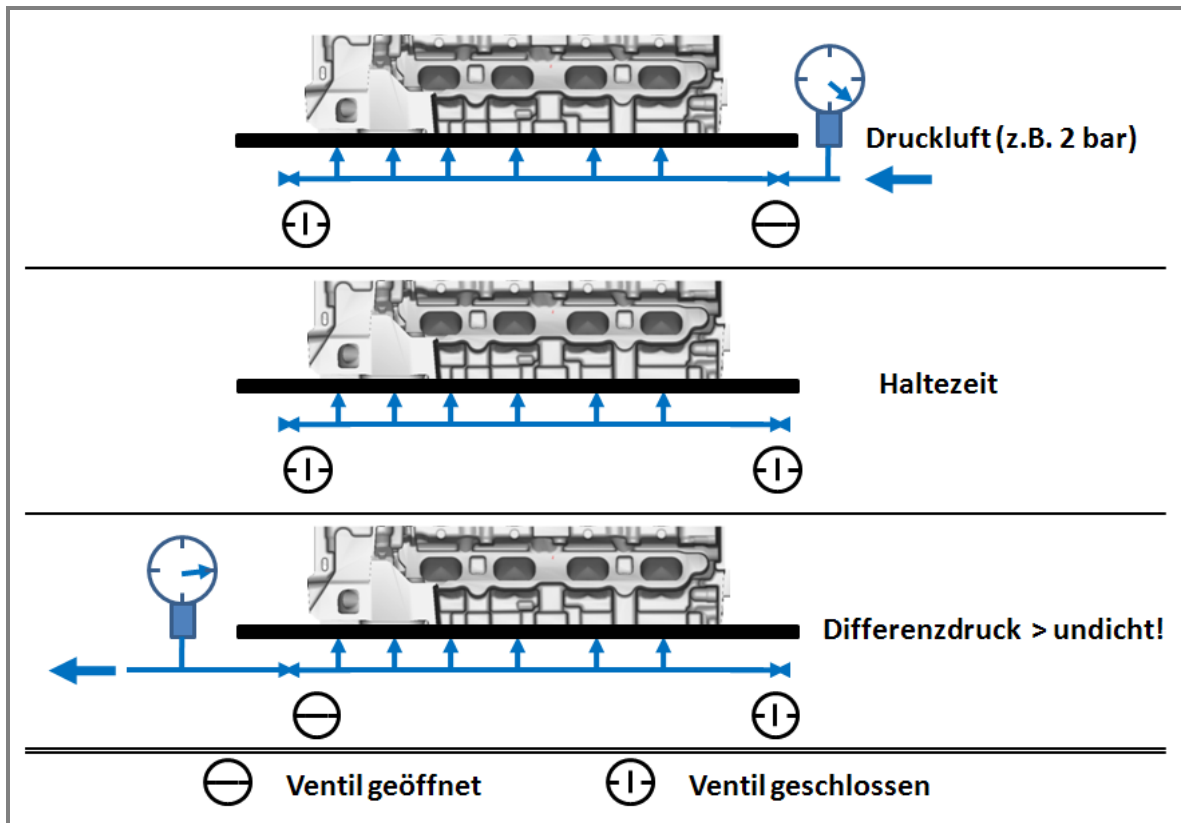


Abbildung 20: Schema der Differenzdruck Dichtheitsprüfung

Sobald der Zylinderkopf nach dem Gießvorgang entkernt und gefräst wurde, kann eine Dichtheitsprüfung durchgeführt werden. Wie bereits erwähnt wird der Zylinderkopf auf die Dichtheitsprüfungseinrichtung aufgelegt, abgedichtet und mit Druck beaufschlagt.

Bei den in Abbildung 21 dargestellten Werten handelt es sich um Auszüge aus der Dichtheitsprüfung des ZK N63. In den Spalten wird für jeden Zylinder (Zyl. 1-4) des Zylinderkopfs die Undichtheit in den jeweiligen Kanälen (K1 und K2) festgehalten. Ein- und Auslassseite werden hierbei getrennt voneinander behandelt. In dem Fall der dargestellten Liste wäre Teil 1 ein Gutteil, die Teile 2 und 3 den roten Markierungen zufolge undicht. Geprüft wurde hierbei die Druckdichtheit des Wassermantels. Die für diese Prüfung relevanten Stellen, nämlich die Ein- und Auslasskanäle sind in dieser Auflistung einzeln eingetragen. Ein grünes Feld bedeutet die Dichtheit des Bereiches, ein rotes Feld die Undichtheit. Am Ende der jeweiligen Zeile ist der von der Anlage ausgegebene Differenzdruck angegeben. Die Zahl „-999“ zeigt ein Grobleck, also einen drastischen Druckverlust in diesem Bereich an.

Nr.	Einlassseite								Auslassseite								Diff.
	Zyl. 1		Zyl. 2		Zyl. 3		Zyl. 4		Zyl. 1		Zyl. 2		Zyl. 3		Zyl. 4		
	K1	K2	K1	K2	K1	K2	K1	K2	K1	K2	K1	K2	K1	K2	K1	K2	
1																	0
2																	-7,4
3																	-999

Abbildung 21: Dichtprüfergebnisse am Bsp. ZK N63

Die Teile 2 und 3 sind ab dieser Prüfung als Ausschuss gekennzeichnet und die undichten Stellen werden für etwaige zerstörende Prüfungen markiert. Der Mechanismus der Dichtheitsprüfung stellt eine sehr wichtige, voll automatisierbare Fehlerprüfung im Fertigungsprozess von Zylinderköpfen dar.

### 5.3.2 Zerstörende Prüfung

#### Aufbruch der Fehlstellen

Zur systematischen Fehler-Analyse werden die mittels CT und Dichtheitsprüfung lokalisierten Fehlstellen aufgebrochen. Hierfür werden die Zylinderköpfe in zwölf einheitliche Scheiben gesägt. Diese Scheiben umfassen die in der Dichtheitsprüfung untersuchten Bereiche, nämlich die Ein- und Auslasskanäle. Abbildung 22 zeigt die Einteilung der Scheiben, wobei A1-A4 die vier Auslasskanäle und E1-E4 die vier Einlasskanäle je Zylinder anzeigt. Durch diese Einteilung entsteht pro Brennraum ein Dreierpaket, in deren Mitte während des Gießvorganges jeweils ein Injektor platziert ist (Kreismarkierung in Abbildung 22).

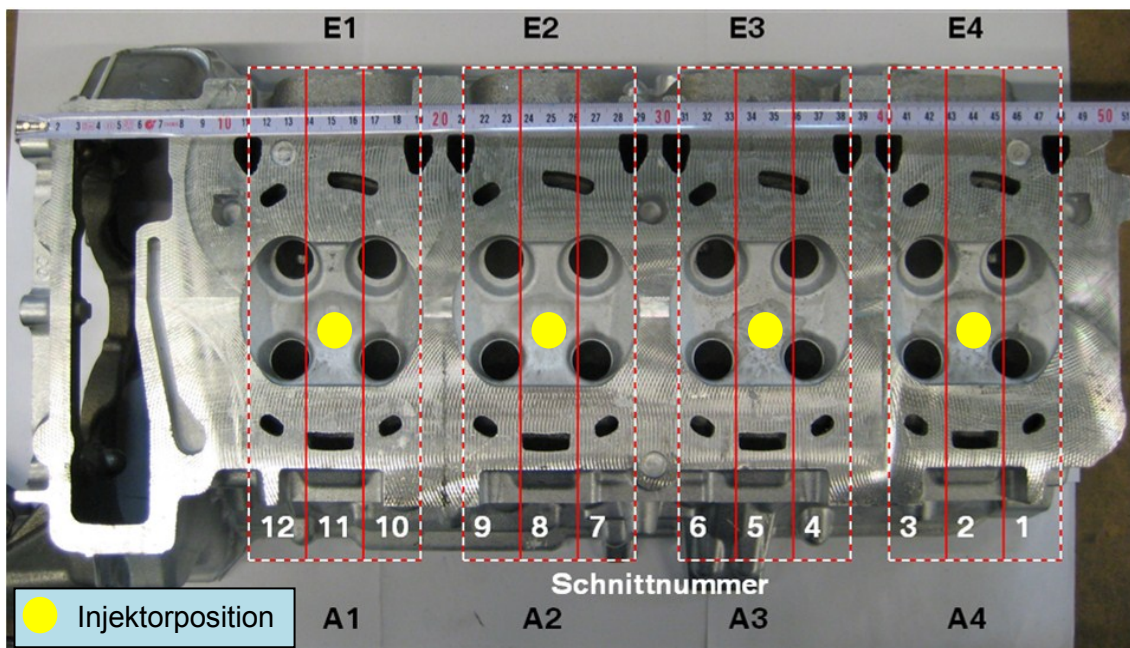


Abbildung 22: Schnittraster am Beispiel ZK N63

Im nächsten Schritt werden die einzelnen Scheiben für die weitere Analyse angesägt und gebrochen. Fehler im Guss stellen eine Schwächung der metallischen Verbindung in diesem Bereich dar, was dazu führt, dass bei Belastung der Bereich des Fehlers Ausgangspunkt eines Risses ist. Das Bauteil bricht in Folge dessen in diesem Bereich, was zum Bruch des Bauteiles führt. In Abbildung 23 ist am Beispiel einer ZK-Scheibe angedeutet, welche Bereiche geschnitten und welche gebrochen werden.

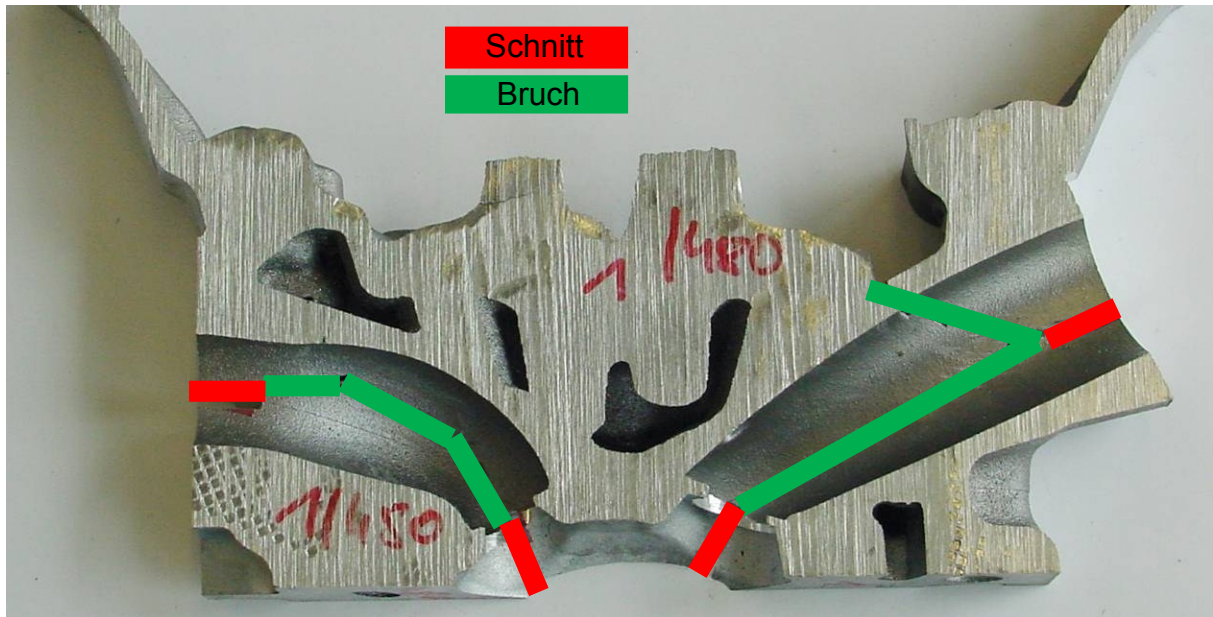


Abbildung 23: Schnitt- und Bruchmarkierung an einer ZK-Scheibe

### 5.3.3 Visuelle Analyse

Hierbei handelt es sich um die Beurteilung der aufgebrochenen Fehlstellen mit freiem Auge. Die Ausprägung des Fehlers, Geometrie, Ausdehnung, Farbe und Topologie können bereits erste Indizien für die Entstehungsursache und den Herkunftsort des Fehlers sein. Im Hinblick auf Oxide lassen sich deutliche Farb-Abstufungen vom Grundwerkstoff und teilweise Unterschiede in der Topologie der Fehlstelle, feststellen. Abbildung 24a zeigt Luftblasen, die sich in einer Engstelle des Gussteiles angesammelt haben, Abbildung 24b eine Oxidhaut. Beide Fehler sind mit freiem Auge klar erkennbar.



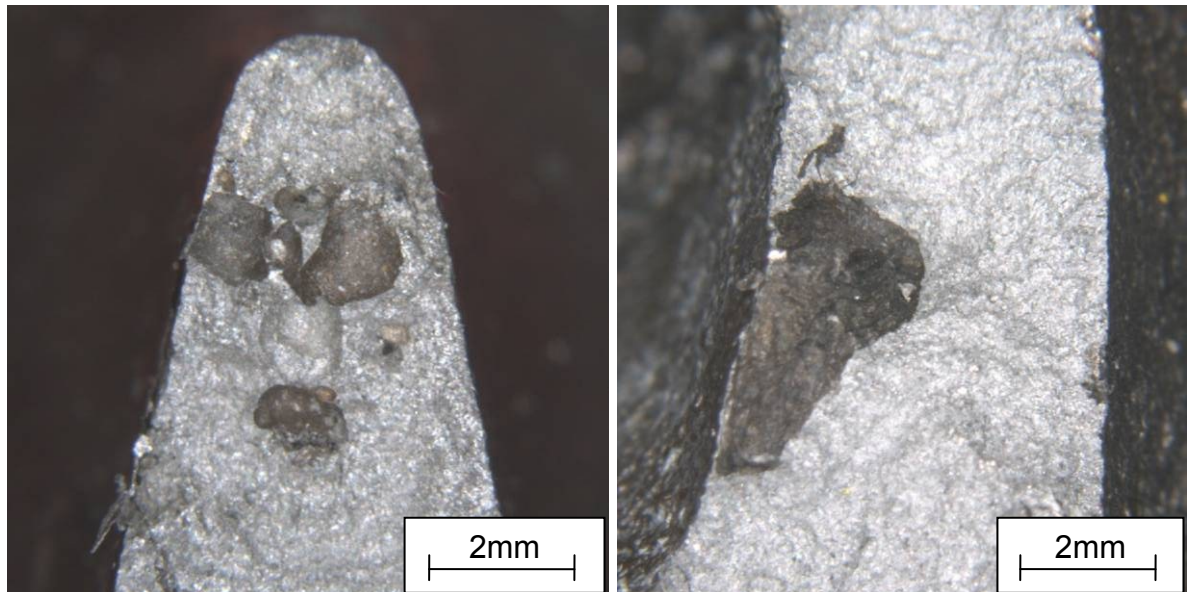


Abbildung 24: a) Blasen in Engstelle b) Oxidhauteinschluss

### 5.3.4 Computertomographie

Die im Bereich der technischen Labortechnik verwendeten Computertomographie-Geräte finden ihr Anwendungsgebiet in der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung. Es handelt sich hierbei um ein Röntgen-Durchstrahlverfahren.

Es gibt grundsätzlich zwei Arten von CT-Anlagen. Wie in den Abbildungen 25 und 26 dargestellt, unterscheidet man zwischen Geräten mit Zeilendetektor und jenen mit Flächendetektor. Der grundsätzliche Aufbau eines CT-Systems besteht aus einer Röntgenquelle für die Strahlenerzeugung, einem Manipulator für die Positionierung des Prüfobjekts, einem Detektor für die Bildaufnahme sowie einer Recheneinheit für die Bilderzeugung (Rekonstruktion), Bilddarstellung und Auswertung.

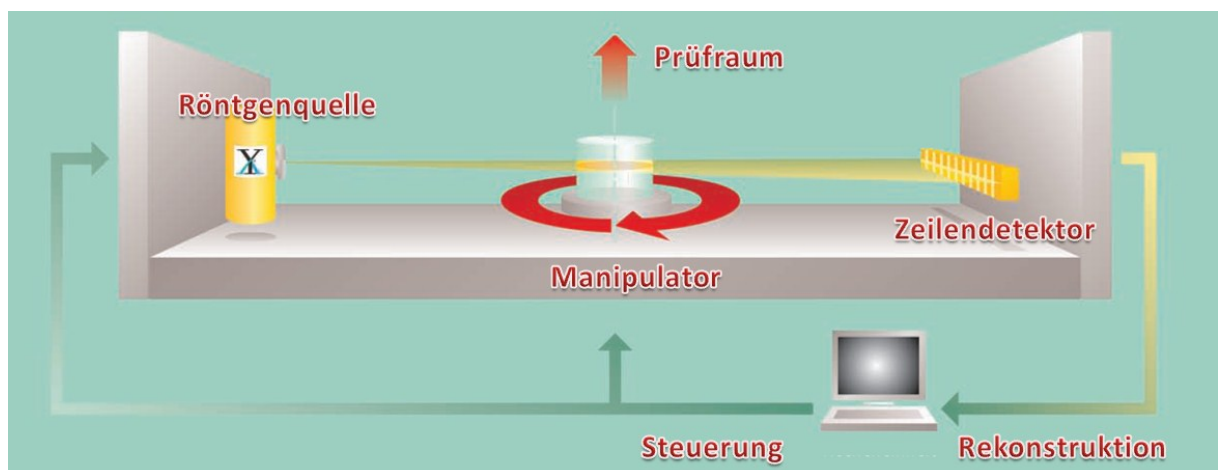


Abbildung 25: Funktionsschema CT mit Zeilendetektor [15]

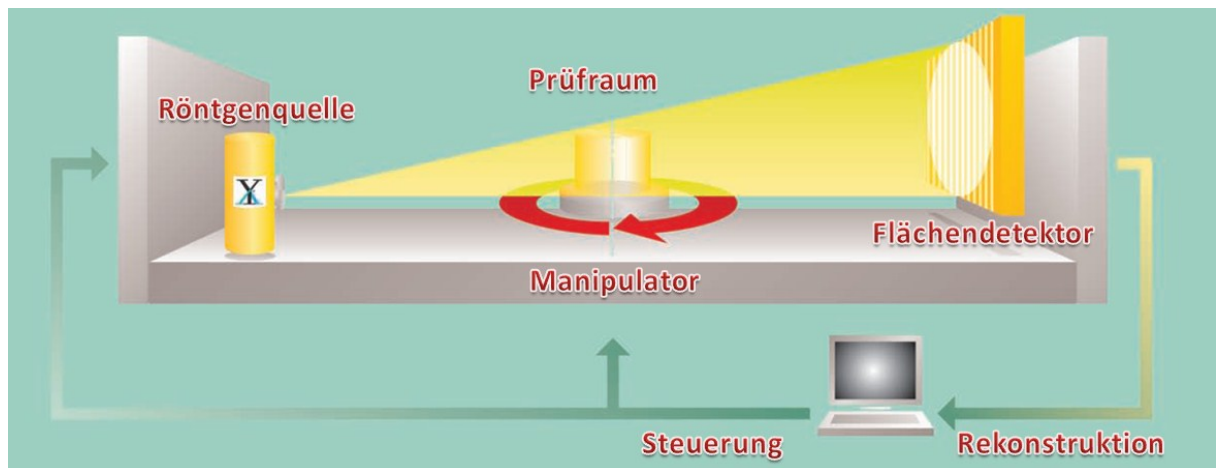


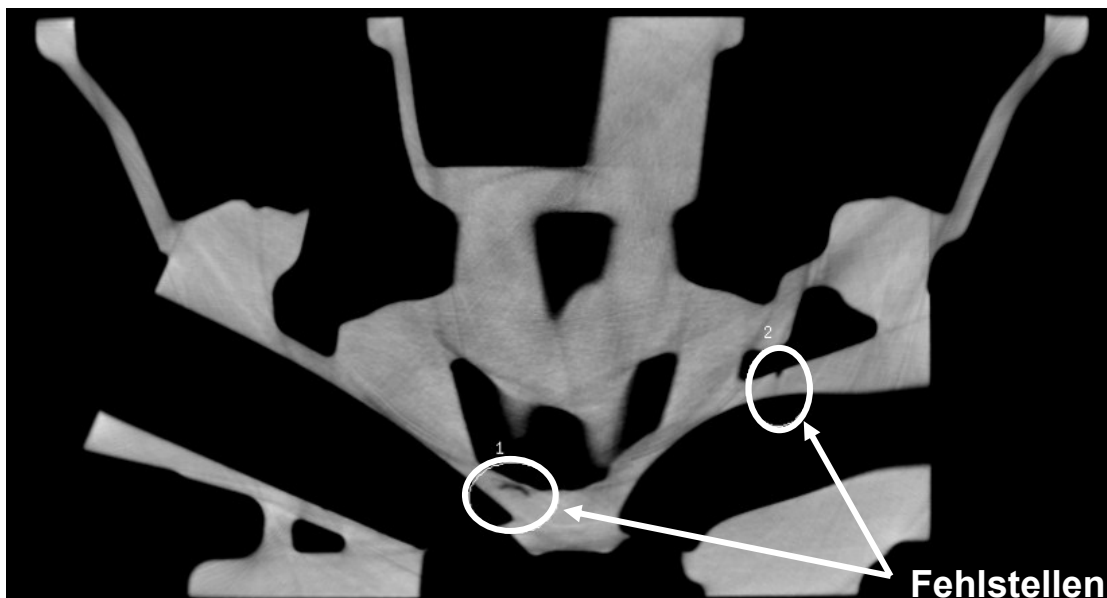
Abbildung 26: Funktionsschema CT mit Flächendetektor [15]

Bei der Computertomographie werden mit Hilfe von Röntgenstrahlen aus mehreren Winkeln Aufnahmen vom Prüfobjekt erzeugt und anschließend zu einem dreidimensionalen Bild verrechnet. Das Manipulationssystem muss deshalb dafür sorgen, dass entweder das Prüfobjekt oder die Röntgenröhre-Detektor-Einheit um 360° drehbar und in der Höhe verschiebbar ist. Abhängig von der Prüfaufgabe werden zur Bildaufnahme entweder Zeilen- oder Flachdetektoren eingesetzt. Der Zeilendetektor nimmt bei jeder Rotation Absorptionsprofile aus genau einer Objektschicht auf, die zu einem Schnittbild (Tomogramm) verrechnet werden. Nach dem Scannen des gesamten Prüfobjekts wird durch positionsgerechtes Zusammensetzen der so erzeugten Tomogramme eine 3D-Darstellung mit hoher Detailerkennbarkeit errechnet. Der Flachdetektor hingegen nimmt bei jeder Rotation des Prüfteils gleich mehrere Schichten des Prüfobjekts auf, die anschließend zu einer 3D-Darstellung verrechnet werden. Innerhalb kürzester Zeiten können so ganze Prüfobjekte gescannt und als dreidimensionale Datenmodelle ausgegeben werden.

Neben der am Standort Landshut verfügbaren CT Anlagen mit Zeilendetektor steht in der Labortechnik am Standort München zusätzlich eine Mikrofokus-CT-Anlage der Marke Yxlon CT Precision mit Flächendetektor zur Verfügung. Beim Mikro-CT, oder auch Mikrofokus-CT genannt, handelt es sich um eine Variante der Röntgenprüfsysteme, die mit einem Feinfokus ausgestattet sind, der ein höheres Auflösungsvermögen als herkömmliche CT-Anlagen ermöglicht. Im Mikro-CT können auch geringe Dichteunterschiede, die in Großraum-CT-Anlagen nicht mehr

darstellbar sind, aufgelöst werden. Diese Anlage ist für genaueste industrielle CT-Anwendungen im Prüf- und Messbereich konzipiert worden. Grundlage hierfür bildet das Mikrofokus-Röntgensystem, das dank eines optimierten 3D-Scanmodus und einer speziellen Inline-Rekonstruktion das Durchstrahlen eines Komplettvolumens innerhalb weniger Minuten ermöglicht [15].

Wie bereits erwähnt werden in der CT-Prüfung die Bauteile geprüft um Fehler in der Gießmatrix feststellen zu können. Die Bandbreite der hier detektierbaren Fehler umfasst all jene, die sich durch Dichteunterschiede vom Grundmaterial abheben. Blasen und Lunker sowie Porositäten sind mittels CT-Prüfung erkennbar. In Abbildung 27 ist der CT-Schnitt eines Zylinderkopfes mit zwei eingezeichneten Fehlstellen dargestellt.



**Abbildung 27: CT-Bild von ZK mit zwei Fehlern**

Die bei dieser Analyse festgestellten Fehler werden nach ihrem Grad der Beeinträchtigung der Funktion des Bauteiles bewertet. Nicht jeder Fehler muss hierbei zwangsläufig zum Ausschuss führen. Kleinere Fehler wie mikrometergroße Blasen in dicken Wandstärken oder Porositäten in Bereichen, denen keine Funktion zugeschrieben wurde, können vernachlässigt werden. Die Serien-CT-Prüfung wird in erster Linie für die Detektion grober Gussfehler verwendet, Oxide sind aufgrund des geringen Dichteunterschiedes und der meist geringen Größenausdehnung nicht detektierbar.

Die für diese Arbeit verwendete Mirkofokus-CT-Anlage ist vom Typ YXLON "Precision".

#### Anlagencharakteristik YXLON "Precision":

<i>Microfokusröntgenröhre:</i>	225kV, max. 320W, Focus min. 5 $\mu$ m bei 5W
<i>Flächendetektor:</i>	2048 <sup>2</sup> Pixel, Pixelgröße 0,2mm <sup>2</sup>
<i>Manipulator:</i>	7 Achsen, 9t
<i>Drehteller:</i>	max. 60°/s, max. 100kg, 8 $\mu$ m Planlauf
<i>Strahlenschutzkabine:</i>	17t, Bleidicke:18-25mm
<i>Objektabmessungen:</i>	$\varnothing$ max. 580mm, H max. 1100mm
<i>Radioskopie:</i>	3 Bilder/s
<i>Kegelstrahlrekonstruktion:</i>	Fa. EXIM
<i>Visualisierungssoftware :</i>	Fa. VG 2.0
<i>Durchschnittl. Voxelgröße:</i>	0,1194 [mm <sup>3</sup> $\cong$ Pixel <sup>3</sup> ]

Bei der Analyse der Oxid-Fehlerteile kann jeweils ein Schnittbild im Zwei- und Dreidimensionalen miteinander ausgegeben werden. Dies erleichtert die Orientierung im Bauteil. Der in Abbildung 28 dargestellte Schnitt zeigt ein Oxid in einer ungebrochenen Scheibe eines Zylinderkopfes.

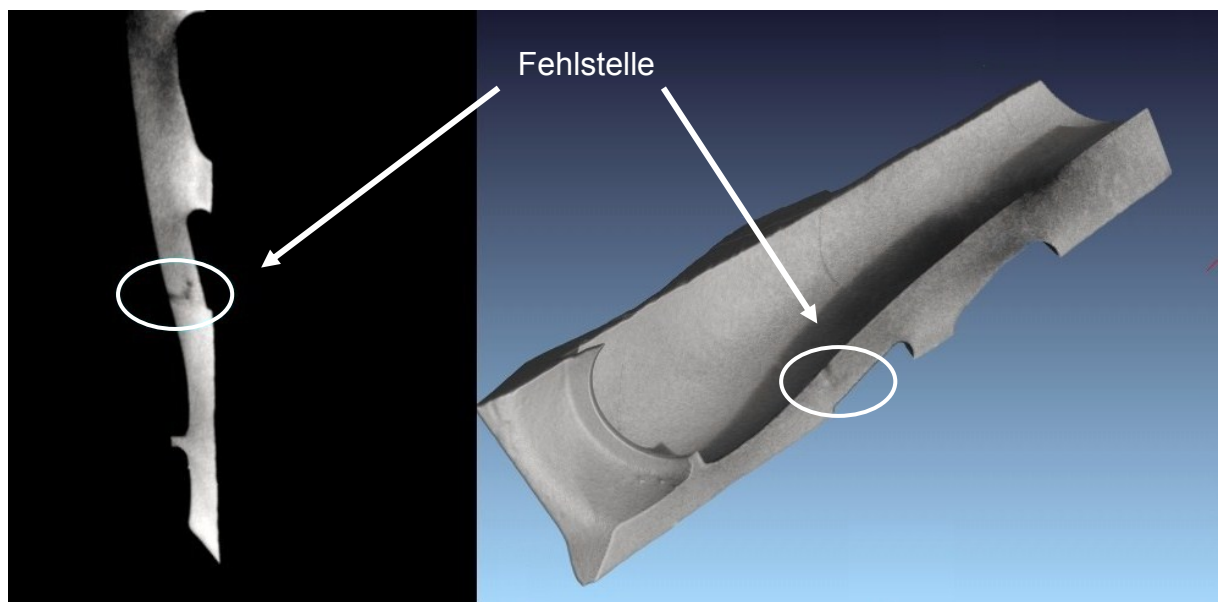


Abbildung 28: 2D und 3D Ausgabe von Mikro-CT

Durch die genaue Lokalisierung der Fehlstelle im ungebrochenen Zustand, kann bereits im 3D-Modell eine Vermessung vorgenommen werden, die im Anschluss auf die Scheibe übertragen wird, siehe Abbildung 29. So kann ein gezielter Aufbruch der Fehlstelle gewährleistet werden.

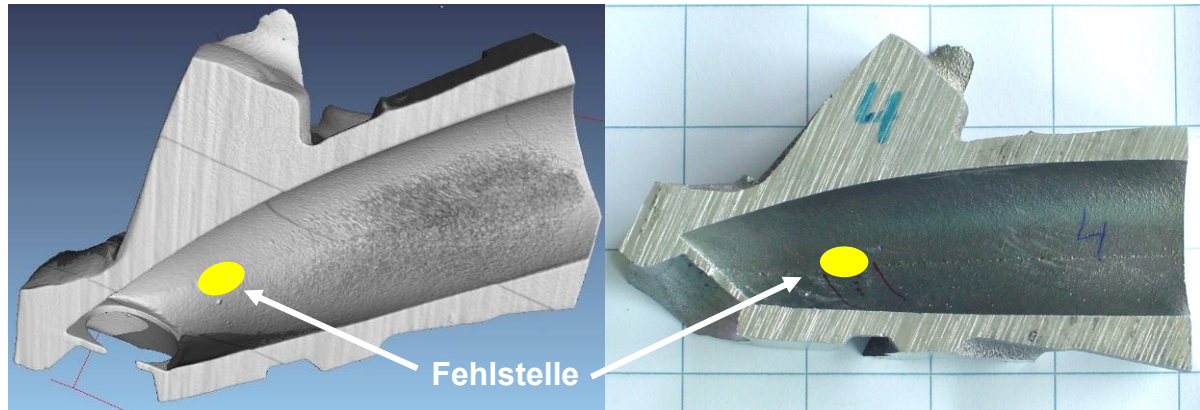
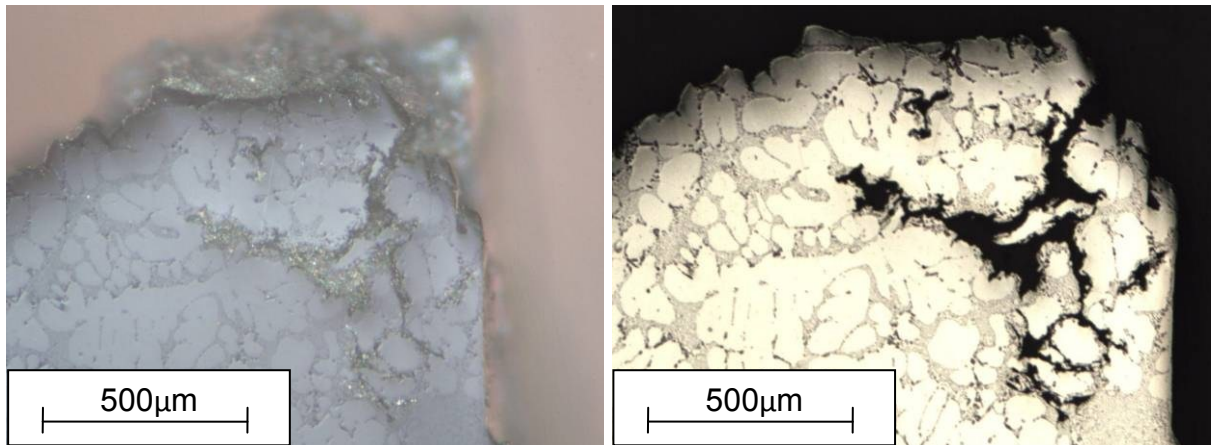


Abbildung 29: Abgleich zwischen 3D-Modell und realem Schnitt

### 5.3.5 Lichtmikroskopie

Die Untersuchungen im Mikrobereich, bzw. die Analyse der Schliffbilder wurde mittels Licht- bzw. Stereomikroskope durchgeführt. Der Hauptunterschied der beiden Geräte liegt im Vergrößerungsvermögen. Aufgrund der abnehmenden Schärfentiefe liegt das Vergrößerungsvermögen des Stereomikroskops unter 100:1, beim Lichtmikroskop kann dieses deutlich überschritten werden. Beim Stereomikroskop wird im Gegensatz zum Lichtmikroskop das Objekt durch zwei getrennte Strahlengänge betrachtet, wodurch ein räumlicher Eindruck entsteht.

Von ausgewählten Fehlstellen werden Schliffbilder angefertigt. Durch Analyse der umgebenden Metallstruktur können Rückschlüsse auf die Art der Entstehung gezogen werden. Die Vorbereitung der Fehlstellen für die Schliffbildanalyse beinhaltet die Extraktion des Fehlers, das Einbetten in Bakelit, sowie das Schleifen und Polieren der Fehlstelle. Im Anschluss kann im Stereo- bzw. Lichtmikroskop die aufbereitete Fläche kontrolliert und ausgewertet werden. Aus Abbildung 30 wird deutlich, wie sich die unterschiedlichen Abbildungsarten zwischen Stereo- und Lichtmikroskop unterscheiden. Es wurde hierfür dieselbe Ansicht und Vergrößerung des Schliffes einer Oxidhaut eingestellt.



**Abbildung 30: Vergleich Stereo- und Lichtmikroskop**

Einer der Vorteile des Stereomikroskops liegt darin, dass Topologie-Informationen der Fehlstelle erkennbar sind. Die Analyse im Lichtmikroskop bringt Vorteile in der Unterscheidung der Gefügestruktur und einen besseren Kontrast vom Material zur Einbettmasse.

### **5.3.6 Rasterelektronenmikroskopie (REM) und energy dispersive X-ray spectroscopy (EDX) Analyse**

Die Analysen im Mikrobereich wurden auf einem Rasterelektronenmikroskop der Marke Zeiss EVO® durchgeführt, dargestellt in Abbildung 31. Zur Analyse wird die Probenoberfläche von einem fein fokussierten Elektronenstrahl abgerastert. Es kommt zu Wechselwirkungen der Elektronen des Strahls (Primärelektronen) mit den Atomen der Probe. Durch diesen Vorgang werden Elektronen zurückgestreut (Rückstreuungselektronen) oder aus den Atomen herausgelöst (Sekundärelektronen) und mittels geeigneter Detektoren registriert. Die Ausbeute ist abhängig von der Geometrie der Probenoberfläche und den Atomen der Probe. Die Abbildung erfolgt wie beim Fernseher nach dem Rasterprinzip.

Der komplette Vorgang findet im Hochvakuum statt, um Wechselwirkungen mit Atomen und Molekülen in der Luft zu vermeiden. Mittels Magnetspulen wird der Elektronenstrahl auf dem Objekt fokussiert. Der in diesem Punkt auftreffende Elektronenstrahl verursacht Wechselwirkungen mit dem zu detektierenden Material, die Informationen über die Beschaffenheit des Objekts geben. Die Intensität des Signals wird ausgewertet. Helligkeit und Kontrast des Bildes werden über die Intensität der detektieren Elektronen gesteuert.



Abbildung 31: Rasterelektronenmikroskop Zeiss Typ EVO® [18]

Es können zwei verschiedene Darstellungsarten gewählt werden:

**Sekundärelektronenbild:** Hochauflösende Abbildung der Oberfläche  
Topografie: Reliefartige Darstellung der Oberfläche mit geringerer Auflösung.

**Materialkontrast:** Die Rückstreuung von Elektronen ist vom Atomgewicht abhängig. Es können damit Elementverteilungen dargestellt werden, jedoch keine Elementbestimmungen durchgeführt werden.

Über an das REM adaptierte Analysesysteme, wie z.B. eine EDX-Einheit, können Mikroanalysen (Elementbestimmungen, quantitative Analysen, Elementverteilungen und Konzentrationsprofile einzelner Elemente) durchgeführt werden. Die EDX-Analyse gehört zu den röntgenspektroskopischen Verfahren. Die Probe wird, analog zu Abbildung 32, mit einer Strahlung angeregt (z.B. Beschuss mit Elektronen im REM) und dadurch Elektronen aus den inneren Schalen herausgeschlagen. Der aufgrund dieser Lücke entstehende instabile Zustand wird durch Nachbesetzen eines Elektrons aus einem höheren Orbital ausgeglichen. Die bei diesem Orbitalwechsel

entstehende charakteristische Strahlung ( $K\alpha$ ,  $K\beta$ ,  $L\alpha$ ) kann detektiert und für die Klassifizierung von Elementen herangezogen werden.

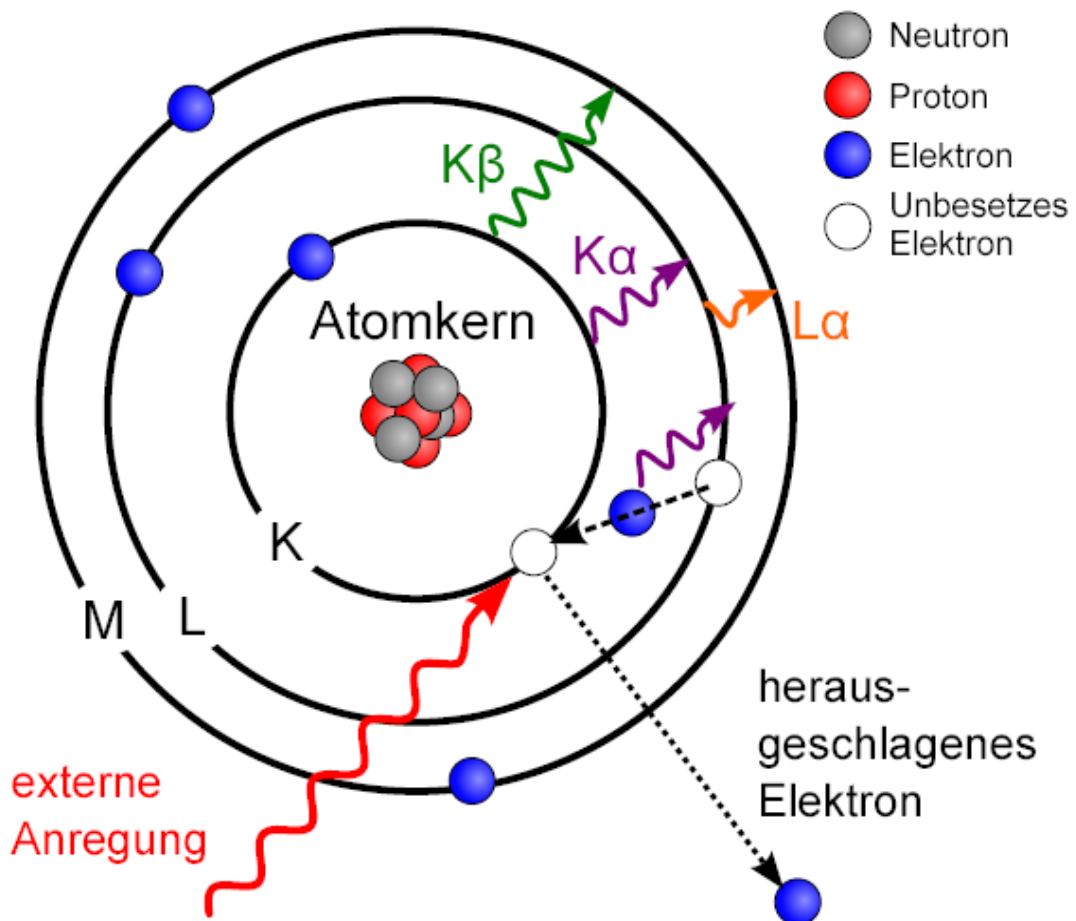


Abbildung 32: Atommodell zur Erklärung der Entstehung der Röntgenemission (EDX) [19]

Bei der Analyse mittels EDX ist großes Augenmerk auf die Funktionsweise zu legen, um die erhaltenen Ergebnisse sicher interpretieren zu können. Bei der Anregung durch den Primärelektronenstrahl wird nicht nur an der Oberfläche gemessen, sondern es entsteht ein angeregtes Volumen. Aus diesem birnenförmigen Bereich wird die Information über den gemessenen Werkstoff gewonnen. Ist der gemessene Bereich sehr dünn, kann viel Information aus dem Untergrund im Messergebnis enthalten sein.



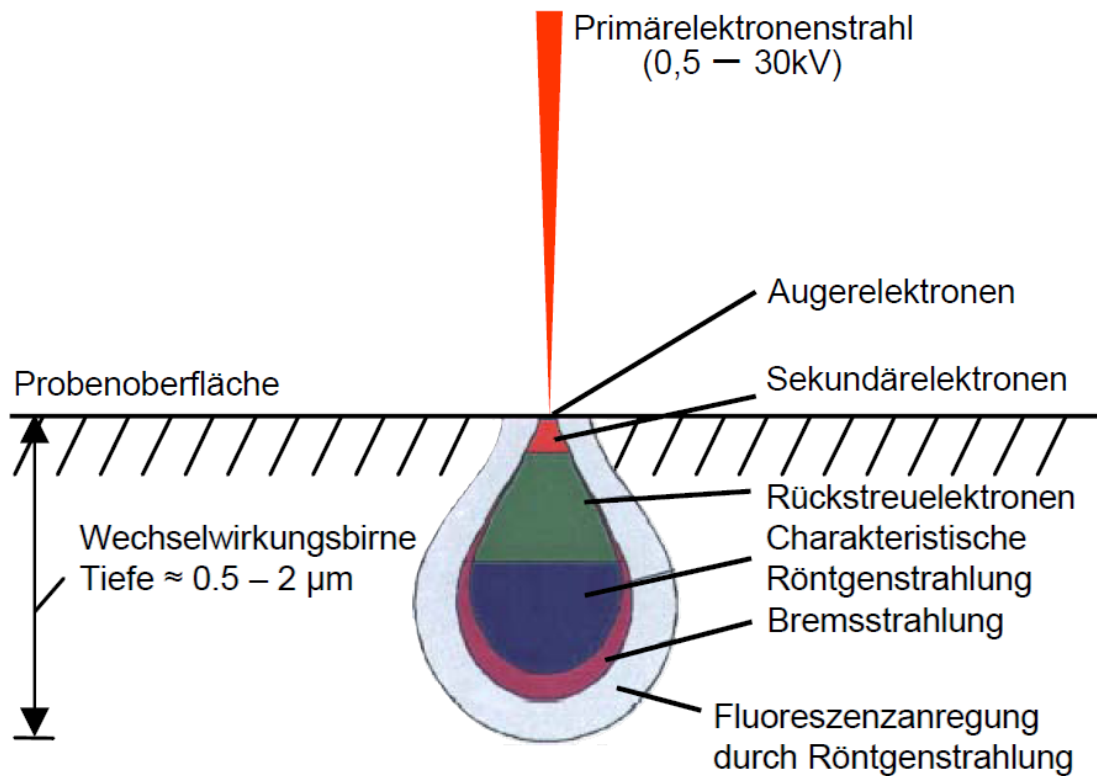


Abbildung 33: Funktionsweise EDX mit angeregtem Volumen [20]

Ein Beispiel einer REM-Aufnahme einer Fehlstelle und der dazugehörigen EDX-Analyse befindet sich in Abbildung 34. Der direkte Vergleich der Messung der Fehlstelle mit dem Grundwerkstoff (GSt) gibt Aufschluss über die mögliche Zusammensetzung, z.B. der Oxidhaut. Es zeigt sich hierbei neben den Legierungselementen ein erhöhter Anteil an Sauerstoff.

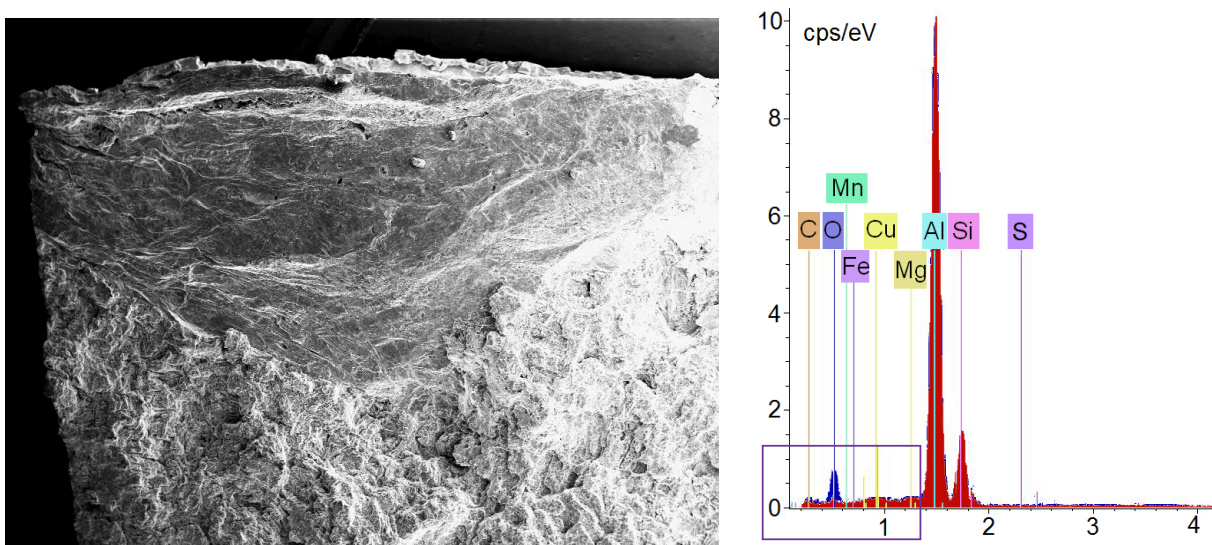


Abbildung 34: REM-Bild mit Oxidhaut und EDX-Spektrum der Fehlstelle

### 5.3.7 Eigenresonanzmessung „Quasar PCRT“

Das Prüfverfahren „Quasar PCRT [Process Compensated Resonant Testing]“ basiert auf der Anregung und Messung von Resonanzfrequenzen im Bauteil. Die physikalischen Grundlagen die Quasar zugrunde liegen, können vereinfacht über das Modell der Schwingungsanregung von Atomen dargestellt werden. Für die Erklärung der Entstehung von Resonanzen in einem Festkörper soll das Modell in Abbildung 35 näher betrachtet werden. Es zeigt ein Raumgitter von Atomen, welche durch ihre Abstoßungs- und Anziehungskräfte in ihren Ruhelagen festgehalten werden. Dies wird symbolisch durch Verbindungen der Atome mit Federn dargestellt. Wird nun auf die Oberfläche des Körpers eine Schwingung aufgebracht, so breiten sich Longitudinal- und Transversalwellen durch das Bauteil aus. Die Atome schwingen in Folge dessen in ihrer Eigen- oder Resonanzfrequenz, also mit gleicher Frequenz und konstanter Amplitude. Fehler im Bauteil wirken sich auf das Schwingungsverhalten der Atome aus und verändern somit seine Resonanzfrequenz, siehe Abbildung 36.

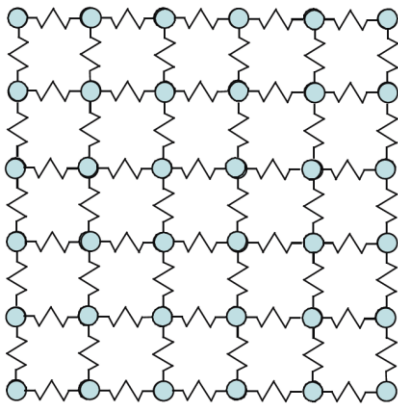


Abbildung 35: Federmodell ohne Fehler

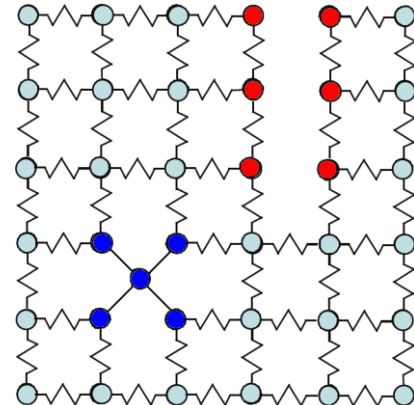


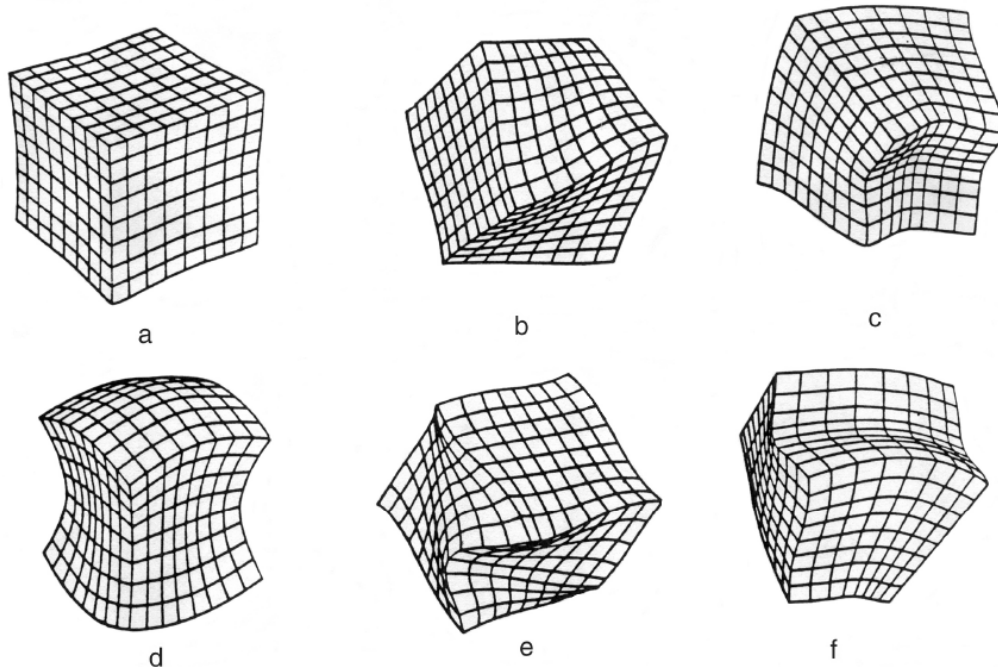
Abbildung 36: Federmodell mit Fehlstellen

Der Zusammenhang zwischen der Resonanzfrequenz und Bauteileigenschaften wie Steifigkeit ( $k$ ) und Masse ( $m$ ) eines Körpers ist dargestellt als

$$f_{\text{Res}} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Weitere Einflussfaktoren auf die Resonanzfrequenz haben Geometrie Härte, Gefügezusammensetzung, Dichte und Temperatur des Bauteils. Für die Analyse der Bauteilqualität nutzt Quasar die besagten physikalischen Eigenschaften des

Prüfkörpers. Dieser kann nach Anregung mit verschiedenen Frequenzmustern verschiedene Schwingungs- bzw. Resonanzverhalten annehmen. Ein Teil der möglichen Bewegungsformen ist in Abbildung 37 a-f dargestellt.



**Abbildung 37 a-f.: Schwingungs- bzw. Resonanzverhalten eines Körpers [16]**

Die Frequenz mit der das Bauteil auf die Anregung „antwortet“, also die Resonanz- oder Eigenfrequenz ist wie bereits angesprochen von den Werkstoffkonstanten, der Masse sowie den Abmessungen des Bauteils abhängig. Durch die Anregung mit variierenden Frequenzmustern werden verschiedene Resonanzantworten erhalten, die sich je nach Qualität des Bauteiles unterscheiden. Durch Fehlstellen wie Lunker, Risse, Poren oder Oxide verändert sich das Resonanzverhalten des Bauteils und können somit detektiert werden. Fehlerart und -ort sind jedoch nicht bestimmbar. Temperatur- und Materialveränderungen bzw. Veränderungen der Form und Prozessparameter innerhalb einer Serie führen ebenfalls zu Bauteilen mit unterschiedlichen Resonanzeigenschaften. Diese können sich als Störeinflüsse negativ auf die Messung der Resonanzfrequenz eines Gussteils auswirken. Größtes Augenmerk gilt somit der Sicherung konstanter Prozessparameter und Bauteileigenschaften.

Abbildung 38 zeigt schematisch den Aufbau der Quasar-Prüfeinrichtung. Es handelt sich hierbei um eine Prüfkammer, in der auf Schallisolatoren das Prüfobjekt aufgelegt

wird. Der als Spitze ausgebildete Frequenzgeber (Piezo), sowie die Abnehmer werden mit einer definierten Niederhalte kraft auf das zu prüfende Objekt aufgesetzt. Während des Prüfvorganges wird vom Frequenzgeber das Spektrum auf den Bauteil übertragen und die Resonanzschwingungen von den Abnehmern aufgenommen. Die Daten gehen an eine Recheneinheit weiter und werden dort aufgezeichnet.

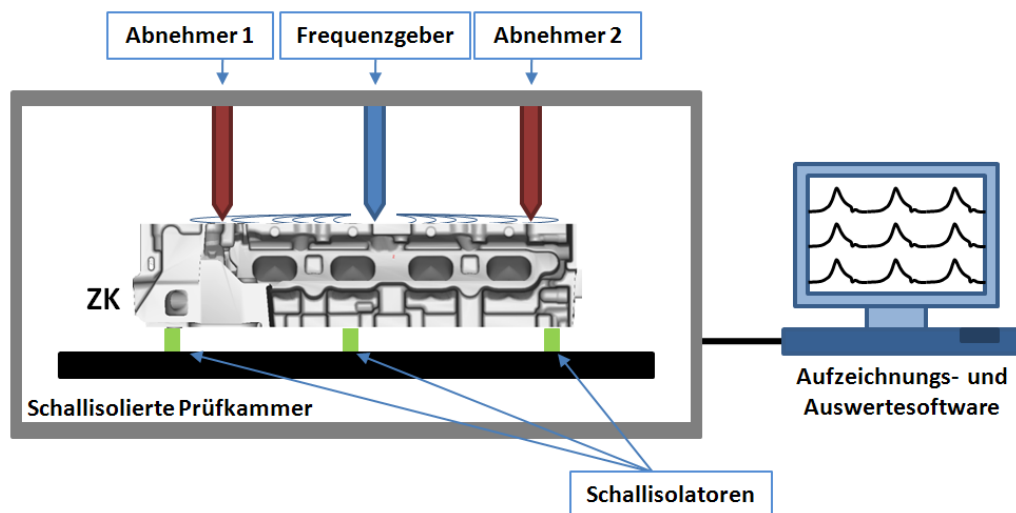


Abbildung 38: Schema Quasar Prüfeinrichtung

Die Messwerte werden als Frequenz/Amplituden-Diagramm angezeigt. Jedes Bauteilresonanzmuster, besteht aus einzelnen Resonanzbändern mit einem eigenen Resonanzmuster aus sogenannten Peaks, dargestellt in Abbildung 39.

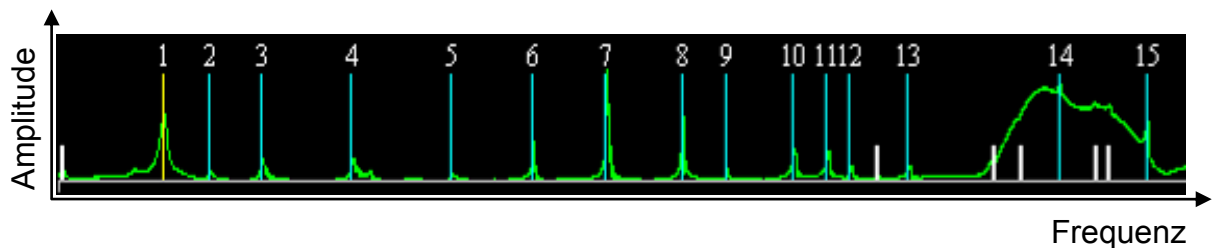


Abbildung 39: Aufgezeichnetes Spektrum eines Zylinderkopfes

Durch den Einsatz der Formel 2 ist es möglich alle Eigenschaften eines solchen Musters mit einem einzigen Wert, hier Q, zu beschreiben. Ein Resonanzmuster, bestehend aus mehreren Resonanzbändern ist somit durch mehrere Q-Werte definiert.

$$Q = \frac{f_c}{\sqrt{\frac{f_1^2 + f_2^2}{2}}} \quad (2)$$

Abbildung 40 zeigt die physikalischen Abhängigkeiten von Formel 2.

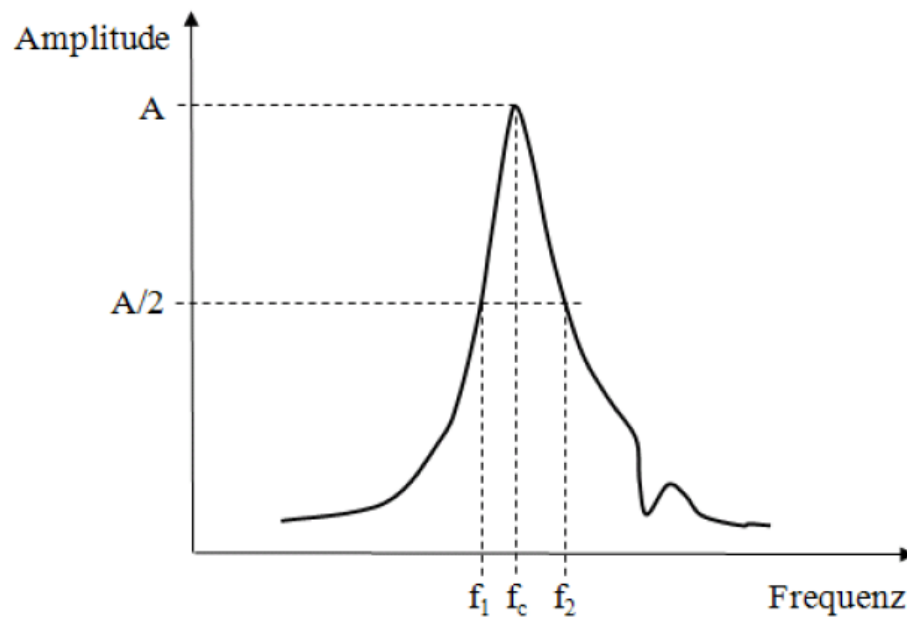


Abbildung 40: Resonanzmustersauswertung, Berechnung Q-Wert

Durch die Anlernphase des Systems, welche Muster den Gutteilen entsprechen und welche Schwankungen innerhalb dieser Muster im erlaubten Rahmen sind, entsteht ein Eigenschaftsraum, dargestellt in Abbildung 41 und 42. Dieser ist von der MTS-Grenze umgeben, siehe Abbildung 42. Die BIAS-Grenze errechnet sich durch die entstehenden Räume der Schlechttteile.

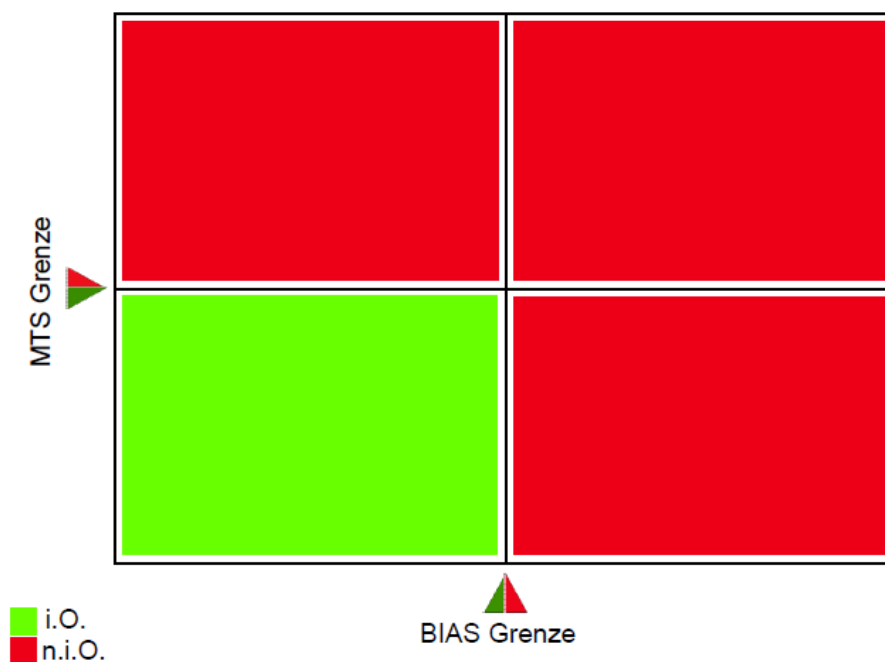


Abbildung 41: Vereinfachte Visuelle Darstellung der Prüfergebnisse [16]

Mit Hilfe dieser Eigenschaftsräume ist es möglich ein unbekanntes Resonanzmuster dem Gut oder dem Schlechtraum zuzuordnen. Befindet sich ein unbekanntes Bauteil, seinen Eigenschaften bzw. seinem Resonanzmuster nach innerhalb dieses Raumes, entspricht es den Gutteilen. Die geprüften Objekte, die so im dritten Quadranten wiederzufinden sind, repräsentieren als Schnittmenge der beiden Testalgorithmen den Teil des Gutraumes, der eine geometrische und strukturelle Ähnlichkeit im Rahmen der Qualitätsvorgaben sicherstellt, dargestellt in Abbildung 43. Auf das Mahalanobis-Taguchi-System (MTS) soll an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden. Ein Einstieg in die Grundlagen findet man in Literaturstelle [17].

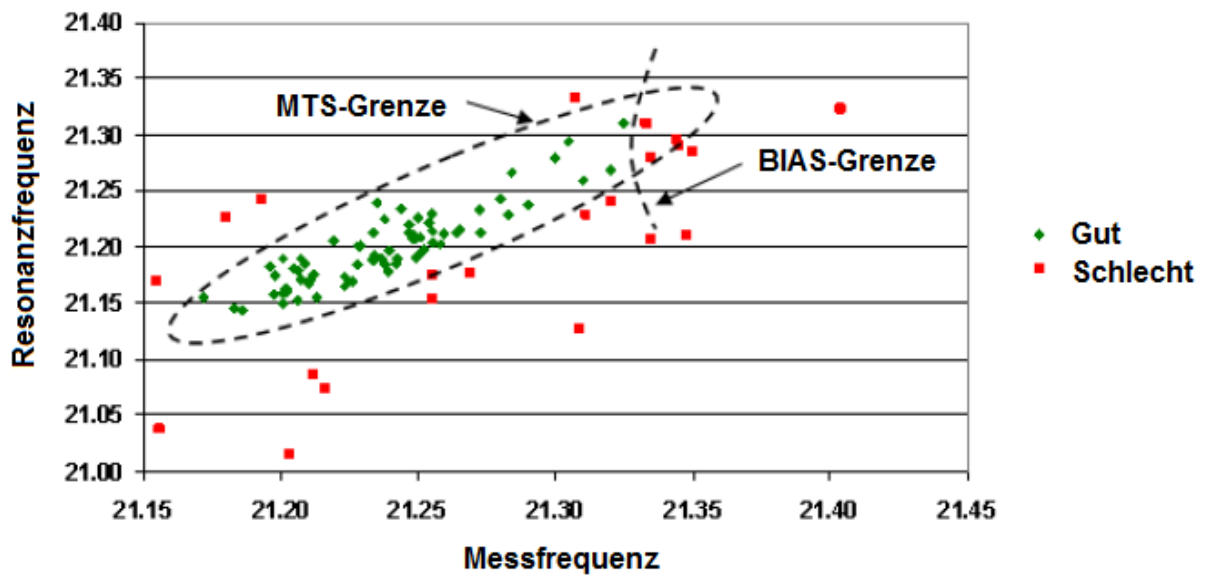


Abbildung 42: Eigenschaftsraum [17]

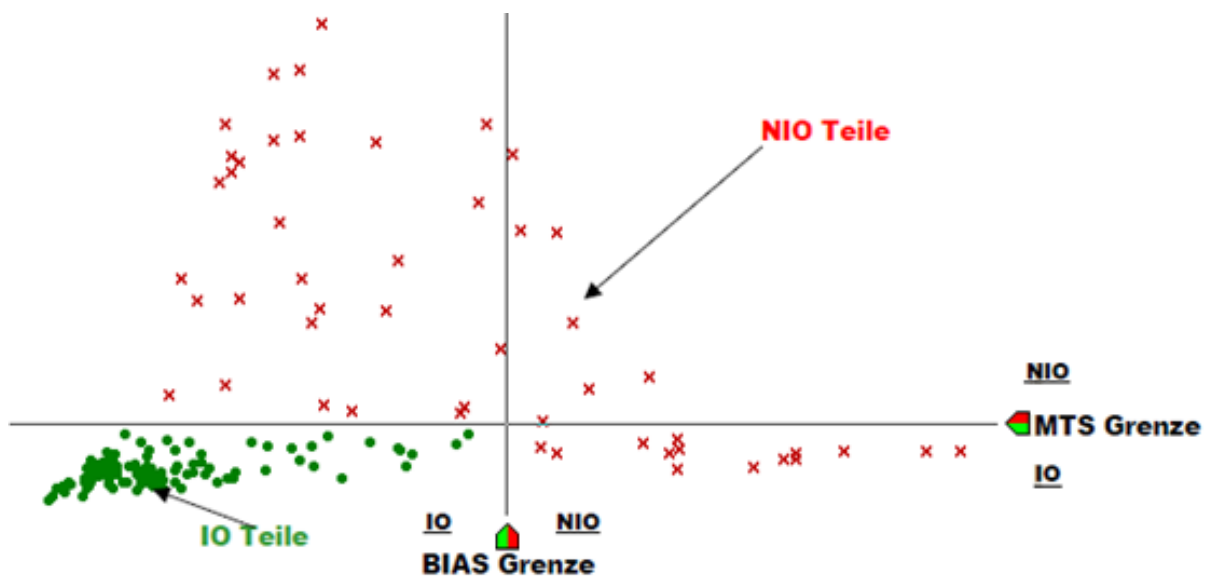


Abbildung 43: Prüfmatrix [16]

---

Die Quasar Prüfung stellt keine Serienprüfung der BMW Group dar. Sie ist derzeit in Erprobung und wurde aus diesem Grund lediglich am ZK N63 angewandt. Da der Zylinderkopf N20 nicht serienmäßig im konventionellen Schwerkraftguss hergestellt wird, wurde aufgrund der fehlenden Referenzteile keine Quasar-Prüfung dieses ZK durchgeführt.

## 6 Ergebnisse

Wie in Kapitel 5.2.2 bereits erklärt, wurden die Zylinderköpfe systematisch zerstörend geprüft, wobei die folgenden Fehlerbilder entdeckt werden konnten:

	Fehlerhäufigkeit	
	ZK N63	ZK N20
<p><b>Fehlerart 1 „altes Oxid“</b></p> <p>Form: flächig, keine klaren Grenzen, ausgefranst</p> <p>Farbe: dunkler gegenüber GSt.</p> <p>Größe: von &lt; 1mm – 20mm</p> <p>Lage: meist mittig in Engstellen</p> <p>REM: im REM-Bild raue Oberfläche, kraterartig</p> <p>EDX: Spektrum von Sauerstoff zeigt große Differenz zu GSt.</p> <p>CT/<math>\mu</math>-CT: im CT klar erkennbar, Aussehen ähnlich Pilzgeflecht</p> <p>Schliff: erstreckt sich durch ganzen Schliff</p>	<p>44/55</p> <p>Fehl- stellen</p> <p>=</p> <p><b>80%</b></p>	<p>3/52</p> <p>Fehl- stellen</p> <p>=</p> <p><b>5,8%</b></p>
<p><b>Fehlerart 2 „aufgefaltete Oxidhaut“</b></p> <p>Form: scharfe Kanten, meist konkrete Form</p> <p>Farbe: dunkler gegenüber GSt.</p> <p>Größe: von 2mm – 10mm</p> <p>Lage: meist am Rand</p> <p>REM: im REM-Bild glatte Oberfläche</p> <p>EDX: Spektrum von Sauerstoff zeigt geringe Differenz zu GSt.</p> <p>CT/<math>\mu</math>-CT: weder im CT noch im <math>\mu</math>-CT erkennbar</p> <p>Schliff: dendritisches Gefüge mit einfacher Unterbrechung</p>	<p>9/55</p> <p>Fehl- stellen</p> <p>=</p> <p><b>16,4%</b></p>	<p>49/52</p> <p>Fehl- stellen</p> <p>=</p> <p><b>94,2%</b></p>
<p><b>Fehlerart 3 „kollabierte Gasblase“</b></p> <p>Form: komplexe Formen</p> <p>Farbe: silbrig glänzend</p> <p>Größe: von 2mm – 20mm</p> <p>Lage: variierende Stellen</p> <p>REM: im REM-Bild klare Abgrenzung der OF zum Rest</p> <p>EDX: Spektrum annähernd gleich zu Grundwerkstoff</p> <p>CT/<math>\mu</math>-CT: im CT Dichteunterschied farblich erkennbar</p> <p>Schliff: Keine erkennbaren Störungen im Gefüge, Übergang von dendritischem Gefüge auf Eutektikum, glänzender Bereich im Bruch ist Eutektikum im Schliff</p>	<p>2/55</p> <p>Fehl- stellen</p> <p>=</p> <p><b>3,6%</b></p>	<p>0/55</p> <p>Fehl- stellen</p> <p>=</p> <p><b>0%</b></p>



Im Folgenden wird detailliert auf die jeweiligen Fehlerarten nach Analyseformen gegliedert eingegangen.

## 6.1 Teile-Aufbruch

Basierend auf den Ergebnissen der Dichtheitsprüfung der Zylinderköpfe N63 und N20 wurden repräsentative Teile für die zerstörende Prüfung und anschließende Analyse ausgewählt. Vom Gesamtlos sind jeweils ca. 20 Zylinderköpfe untersucht worden.

### 6.1.1 Fehlerart 1

Fehlerart 1 wurde am häufigsten und in der größten Flächenausdehnung im ZK N63 gefunden. Sofern überhaupt vorhanden wurde diese Art von Fehler im ZK N20 nur in sehr kleinen Ausdehnungen ( $< 1\text{mm}$ ) gefunden. Betrachtet man die Bruchfläche dieser Fehlerart, dargestellt in Abbildung 44, so fällt auf, dass die Oberfläche durchwegs von rauem, kraterförmigem Charakter ist. Größenausdehnungen von 0,5 – 20 Millimeter sind möglich. Der Fehler hat fransenartige Ränder und kann nicht klar abgegrenzt werden. Die bevorzugten Bereiche in denen dieser Fehler vorkommt, sind Engstellen zwischen Kernen bzw. dünnwandige Bereiche. Die erwähnten punktförmigen Vorkommen können jedoch jede beliebige Lage im Bauteil haben. Nach *Campbell* wird diese Art von Oxid als „Altes“, also bereits vor dem Gießvorgang vorhandenes, Oxid bezeichnet.

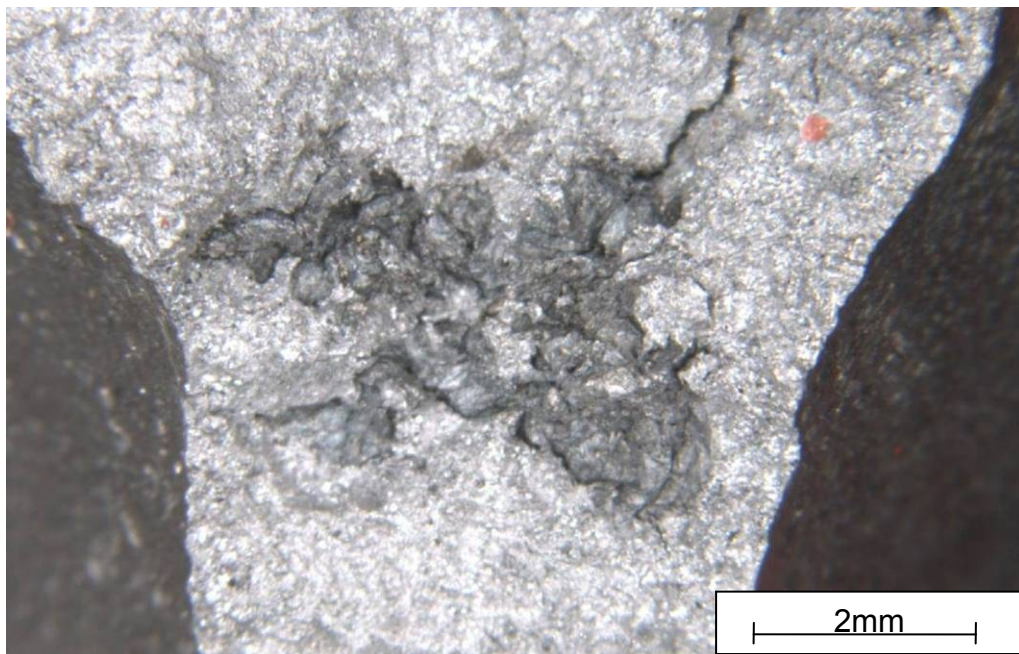


Abbildung 44: Bruchfläche Fehlerart 1 ZK N63

### 6.1.2 Fehlerart 2

Die Fehlerart 2 zeigt, in Abbildung 45 dargestellt, einen scharf abgegrenzten Bereich mit glatter Oberfläche. Die Färbung der Fehlstelle ist deutlich dunkler als das umgebende Metall. Hierbei können zwei unterschiedliche Erscheinungsbilder, die sich in erster Linie in der Intensität der Farbe unterscheiden, aufgezeigt werden, dargestellt in Abbildung 45 und 46. Die Fehlstelle wurde beim ZK N63 durchwegs im Bereich von dünnen Wandstärken, hier jedoch nur am Rand konzentriert, gefunden.



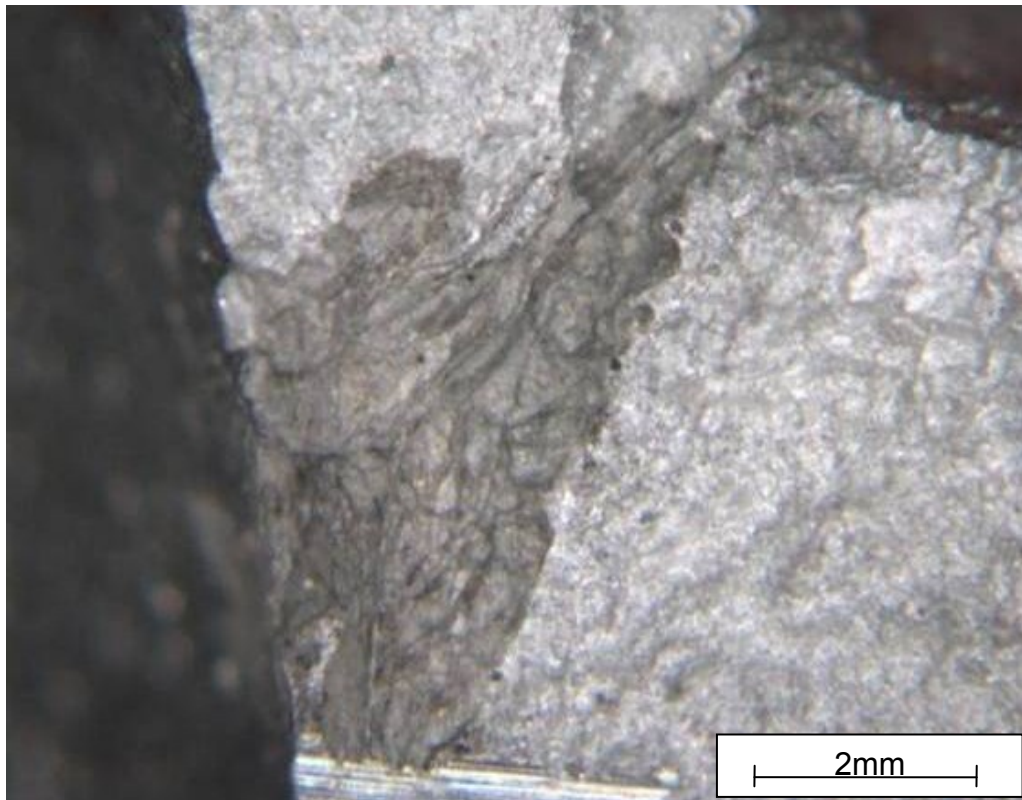
**Abbildung 45: Bruchfläche Fehlerart 2 dunkle Variante ZK N63**



**Abbildung 46: Bruchfläche Fehlerart 2 helle Variante ZK N63**

Beim ZK N20 konnte dieselbe Art von Fehler gefunden werden. Es zeigt ebenfalls durchgehend in allen Analysen einen dunkelgrauen scharf abgegrenzten Bereich. Der Fehler liegt hier jedoch Großteils in der Mitte von Engstellen und ist von einer Wand zur Anderen durchgängig, wodurch in der Dichtheitsprüfung an dieser Stelle

eine Leckage auftritt. Die visuelle Analyse lässt einen Vergleich mit einer zerknüllten Haut zu. Auffällig ist die Form des Fehlers, der Dreiecksartig mit der langen Seite jeweils entlang einer Wand liegt.



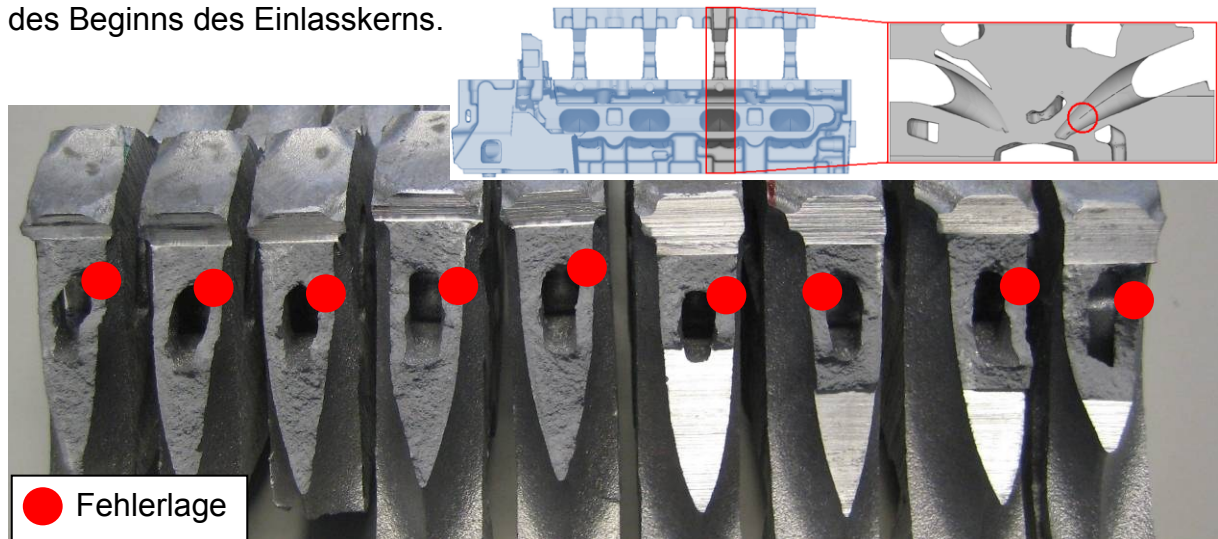
**Abbildung 47: Bruchfläche Fehlerart 1 ZK N20**

Auf der Seite auf der der Fehler spitz zuläuft ist, sofern der Fehler durchgängig ist, an der Oberfläche eine trichterförmige Einschnürung feststellbar. Der Bereich rund um diesen Trichter ist etwas dunkler und matt. Abbildung 48 zeigt diesen Bereich am Beispiel einer ZK-Scheibe vor dem Aufbruch.



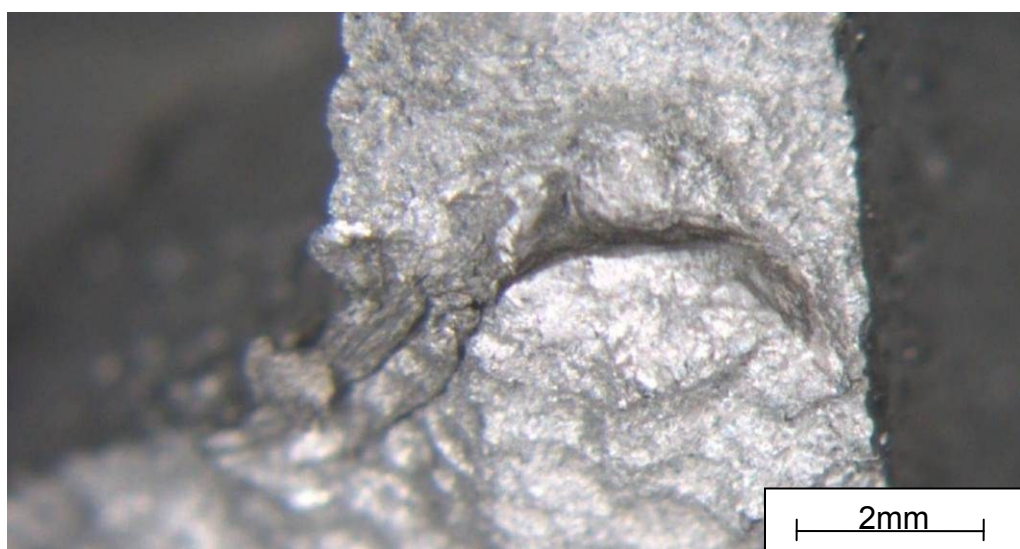
**Abbildung 48: Ungebrochene trichterförmige N20 Fehlstelle**

Bei der zerstörenden Prüfung der N20 Zylinderköpfe wurde diese Art von Fehler mit systematischer Abfolge in Mittelwänden zwischen den Einlasskernarmen der Zylinder 1, 3 und 4 gefunden. Bei diesen lag der Fehler analog zu Abbildung 49 quer durch die Bauteilwand. Zylinder 2 war ebenfalls fehlerhaft, jedoch war der Fehler hier nicht regelmäßig durchgängig. Die Fehlstelle liegt zwischen 10 und 15 Millimeter oberhalb des Beginns des Einlasskerns.



**Abbildung 49: sich wiederholendes N20 Fehlerbild 1**

Eine zu dieser Fehlerart zugehörige Form, die sich von der herkömmlichen Variante der Fehlerart 2 lediglich durch die Lage unterscheidet, ist in Abbildung 50 dargestellt. Dieser Fehler äußert sich ebenfalls durch eine Undichtheit während der Dichtheitsprüfung. Die aufgefaltete Fläche, die bislang parallel zur Bruchfläche lag, ist hier 90° in die Längsrichtung geklappt und ragt in die Bauteilwand hinein. Durch diese spezielle Lage wird beim Aufbruch ein durchgehender Kanal sichtbar, der die beiden Wandoberflächen zu den jeweiligen Einlasskernarmen verbindet.



**Abbildung 50: Bruchfläche Sonderform von Fehlerart 2 ZK N20**

### 6.1.3 Fehlerart 3

Bei Fehlerart 3 handelt es sich um eine selten auftretende Bauteilschädigung. Wie in den Abbildungen 51 und 52 gezeigt, ist die Fehlstelle durch eine glänzende, scharf abgegrenzte Oberfläche in der restlichen Struktur des Bauteils eingebettet. Das Erscheinungsbild ist glatt und glänzend.



Abbildung 51: Bruchfläche Fehlerart 3 Bild 1 ZK N63

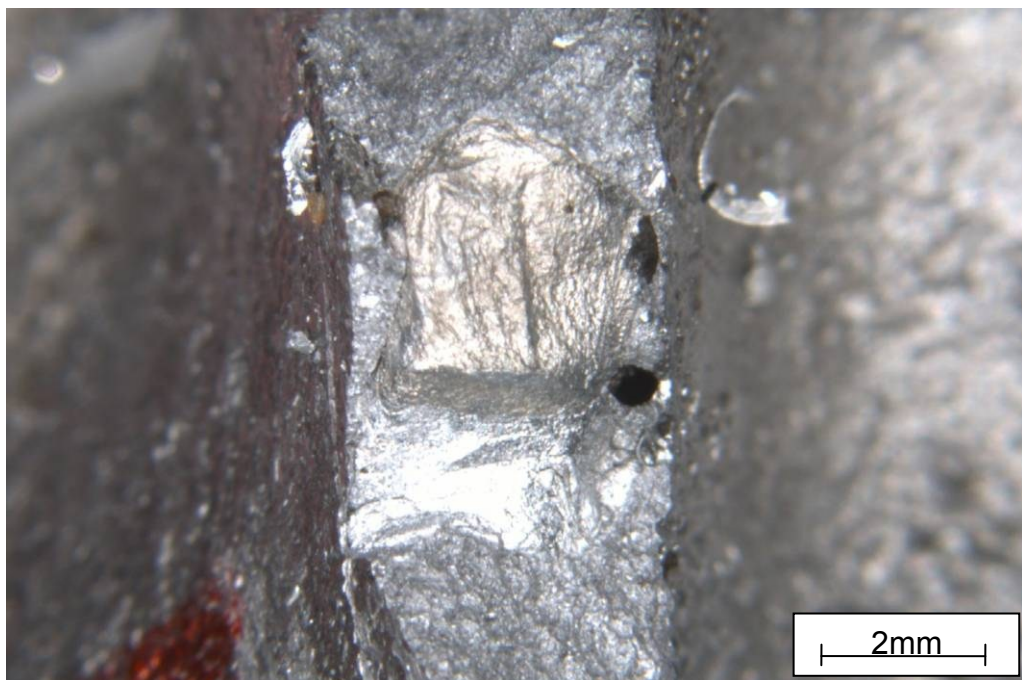


Abbildung 52: Bruchfläche Fehlerart 3 Bild 2 ZK N63

## 6.2 REM / EDX

### 6.2.1 Fehlerart 1

Betrachtet man diesen Fehler im REM, so wird seine charakteristische Form noch deutlicher. Der in Abbildung 53 dargestellte Bereich zeigt die Fehlstelle und eine Vergrößerung aus dem markierten Bereich. Die Oberfläche der Fehlstelle ist im Vergleich zum Grundwerkstoff zerklüftet und rau ausgebildet.

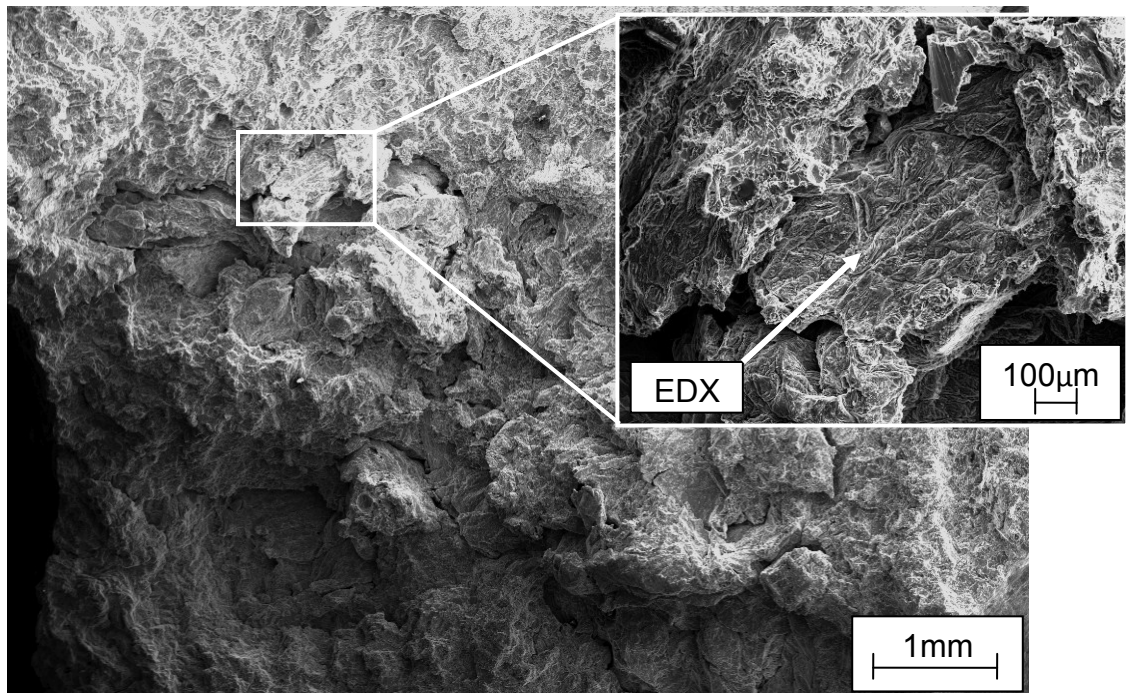


Abbildung 53: N63 Fehlerbild 1 (REM-Analyse)

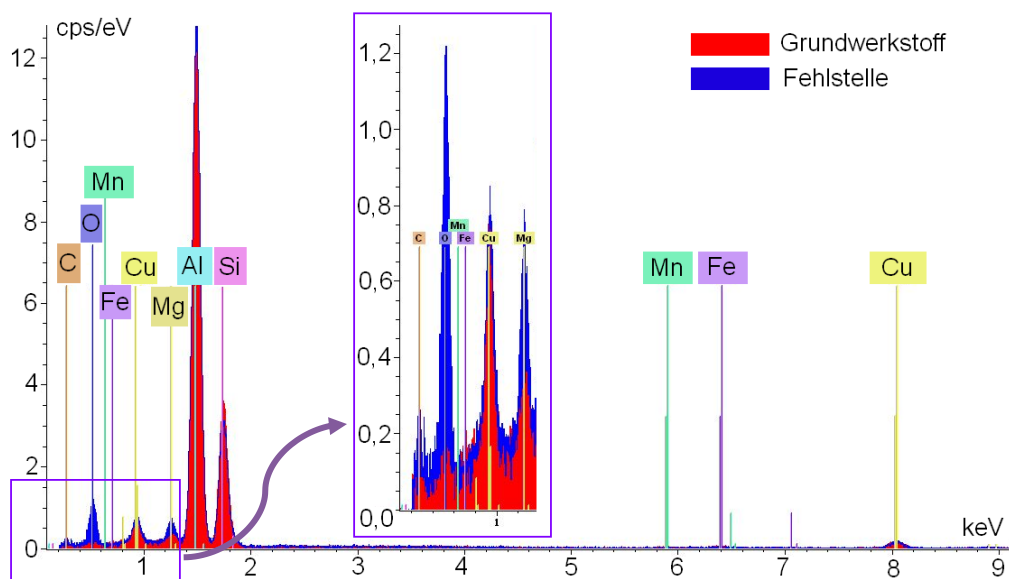


Abbildung 54: EDX-Diagramm von N63 Fehlerbild 1

Die in dem in Abbildung 54 vergrößert gezeigten Bereich durchgeführte EDX-Analyse zeigt einen deutlich erhöhten Sauerstoffgehalt, also eine oxidische Struktur im Fehlerbereich. Ein weiterer deutlicher Anstieg ist bei Magnesium zu verzeichnen. Dieser ist auf die hohe Affinität des Magnesiums zum Sauerstoff zurückzuführen.

## 6.2.2 Fehlerart 2

Die REM-Analyse zeigt analog zum Bild der Bruchfläche einen glatten Bereich, der klar abgegrenzt mit leichten Falten erkennbar in der Metallmatrix liegt. Deutliche Unterschiede zu Fehlerart 1 zeigen sich besonders in der Topologie der Fehlstelle.

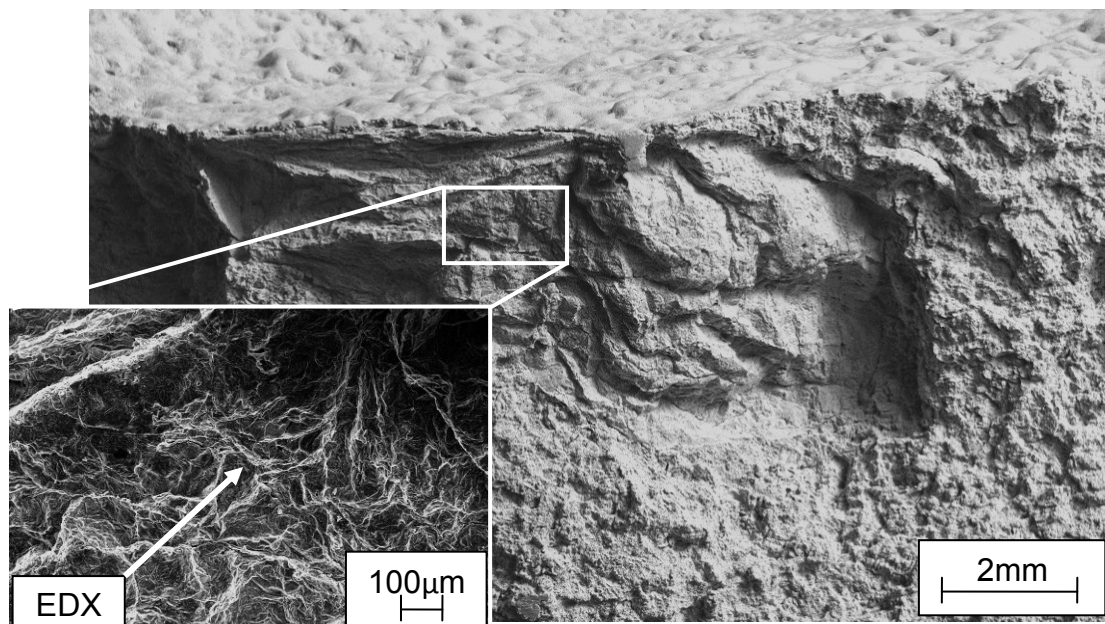


Abbildung 55: N63 Fehlerbild 2 (REM-Analyse)

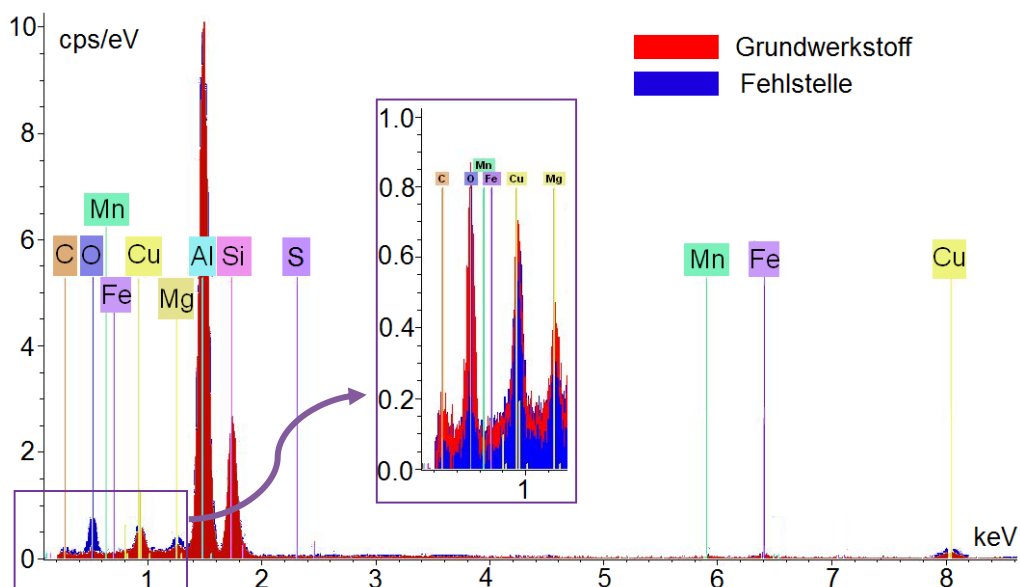


Abbildung 56: EDX-Diagramm von N63 Fehlerbild 2

Die Ergebnisse der EDX-Analyse zeigen bei Fehlerart 2 einen Anstieg von Sauerstoff in der Fehlstelle gegenüber dem Grundwerkstoff. Dieser ist jedoch nicht so stark ausgeprägt wie bei Fehlerbild 1. Ein quantifizierter Vergleich zeigt lediglich die halbe Intensität an Sauerstoff bei Fehlerart 2 im Vergleich zu Fehlerart 1. Desweiteren sind die Intensitäten von Aluminium und Silizium gleich, bezogen auf die Gegenüberstellung von Grundwerkstoff zu Fehlstelle. Der Anstieg von Magnesium ist in der Fehlstelle von Fehlerart 2 zwar noch erkennbar, jedoch deutlich geringer.

Die REM-Aufnahme des ZK N20, dargestellt in Abbildung 57, zeigt ein ähnliches Bild wie die des ZK N63. Man kann eine klare Unterscheidung zum Grundwerkstoff feststellen. Die Fehlstelle ist etwas glatter als das umgebende Material, beinhaltet jedoch gelegentlich längere Falten. Man spricht von einem Seidenüberzug-Bifilm.

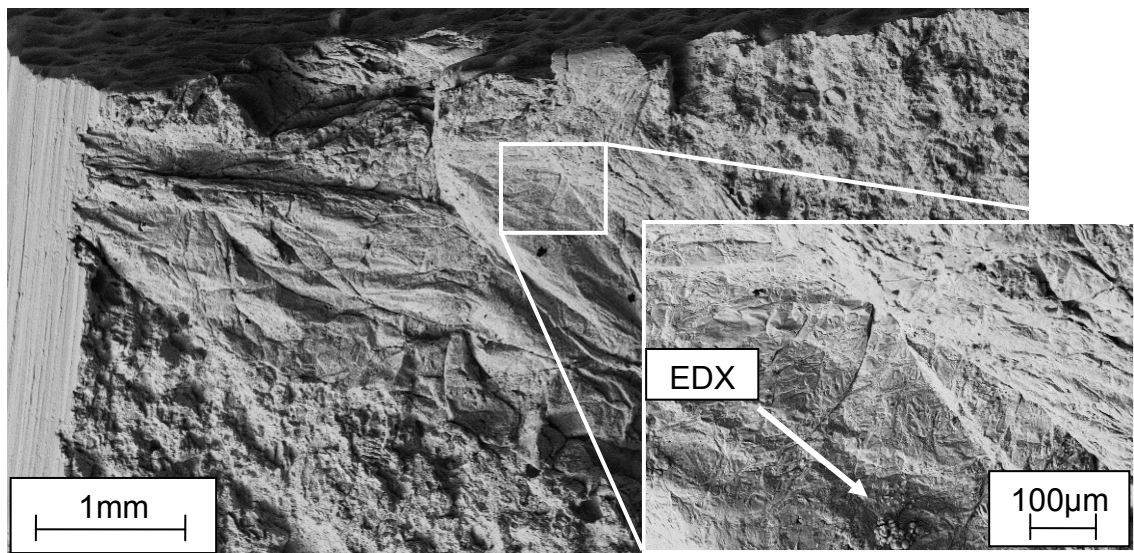


Abbildung 57: N20 Fehlerbild 1 (REM-Analyse)

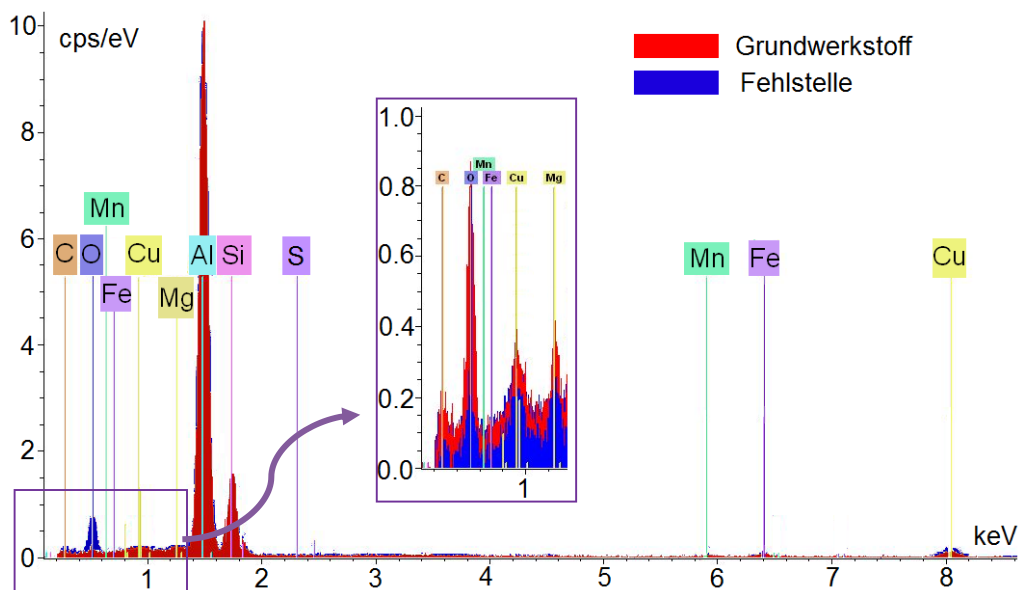
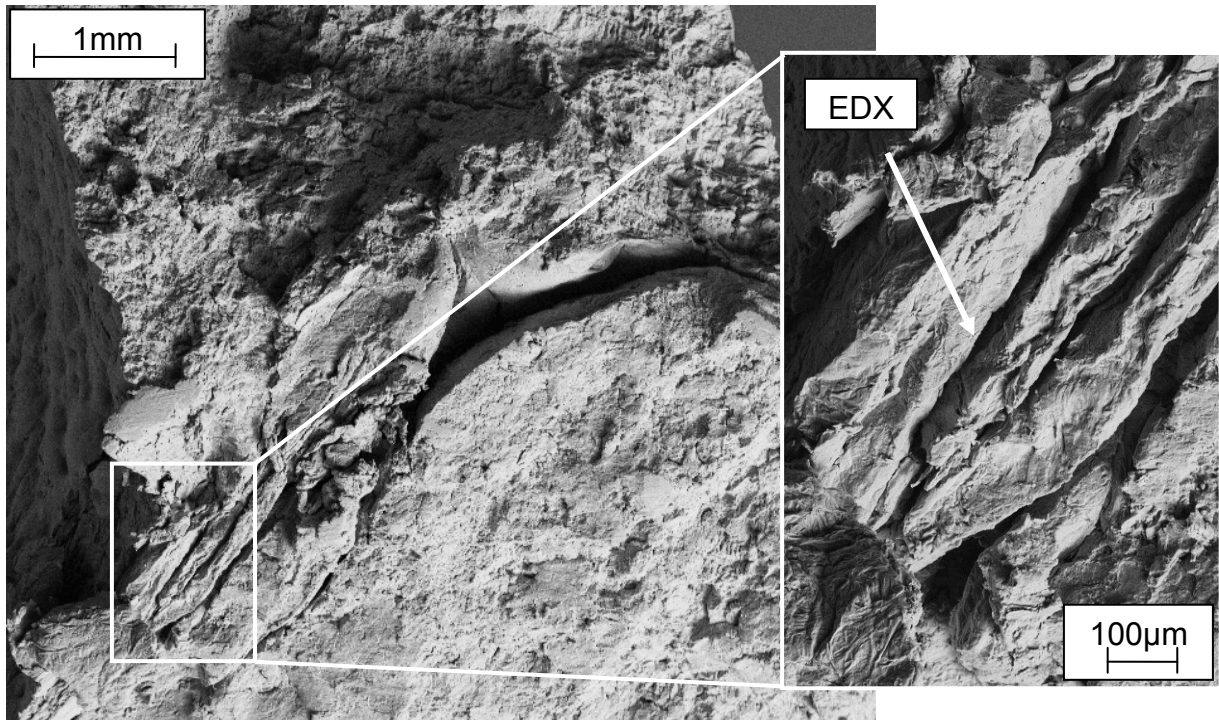


Abbildung 58: EDX-Diagramm von N20 Fehlerbild 2



Die EDX-Analyse, dargestellt in Abbildung 58 zeigt einen leichten Anstieg der Sauerstoff-Intensität, ansonsten jedoch keine besonderen Veränderungen der Zusammensetzung im Vergleich zum Grundmaterial.

Die Sonderform von Fehlerart zwei, also die um 90° nach hinten gedrehte Oxidhaut kann aufgrund des hohen Kontrastumfangs, Auflösungsvermögens und der hohen Tiefenschärfe im REM-Bild sehr deutlich dargestellt werden, siehe Abbildung 59.



**Abbildung 59: N20 Fehlerbild 2 (REM-Analyse)**

Da sich die Fehlerart 2 und die eben gezeigte Sonderform davon lediglich durch die Lage der Zweiteren unterscheiden, können die Ergebnisse der EDX-Analysen auch analog betrachtet werden. Hierbei ist ebenso ein leicht erhöhter Sauerstoffanteil in der Fehlstelle zu verzeichnen.

### 6.2.3 Fehlerart 3

Im REM-Bild der Fehlstelle, Abbildung 60, zeigt sich die starke Abgrenzung des Fehlers vom Grundwerkstoff. Die direkt in der Fehlstelle durchgeführte EDX-Analyse, dargestellt in Abbildung 61 und der Vergleich mit dem Grundwerkstoff zeigt ein annähernd gleiches Bild. Weder beim Sauerstoff noch bei den anderen Elementen sind große Unterschiede feststellbar, da sich die Unterschiede lediglich im Bereich von weniger als 0,1 cps [engl. *counts per second* - dt. Zählsschritte oder Zählimpulse pro Sekunde] bewegen.

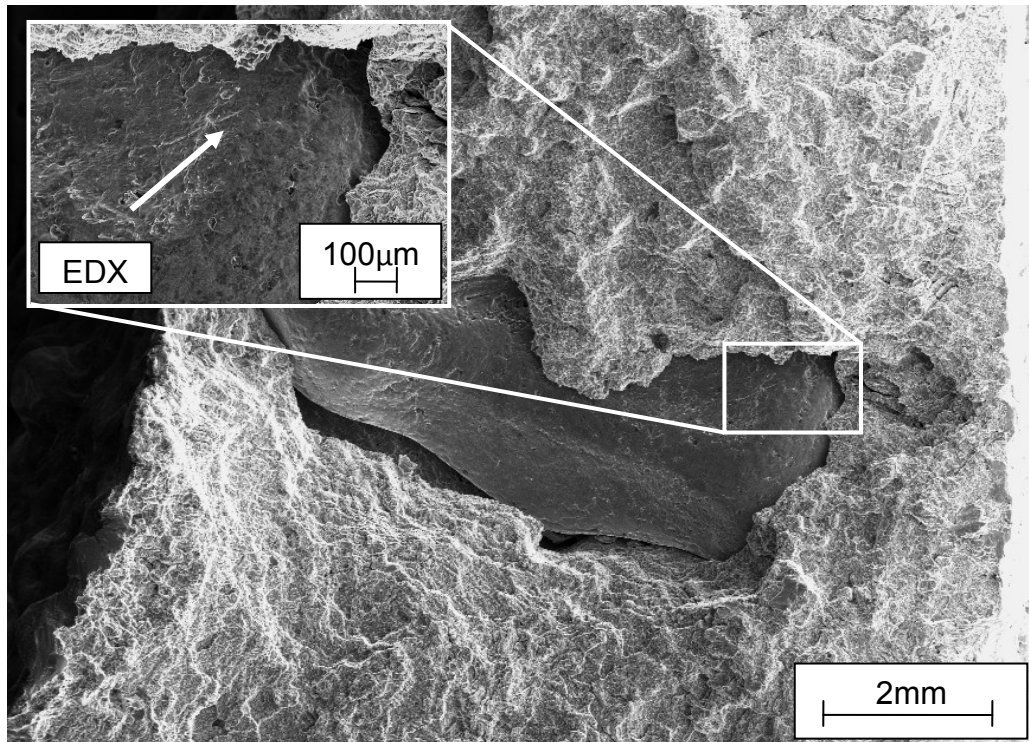


Abbildung 60: N63 Fehlerbild 3 (REM-Analyse)

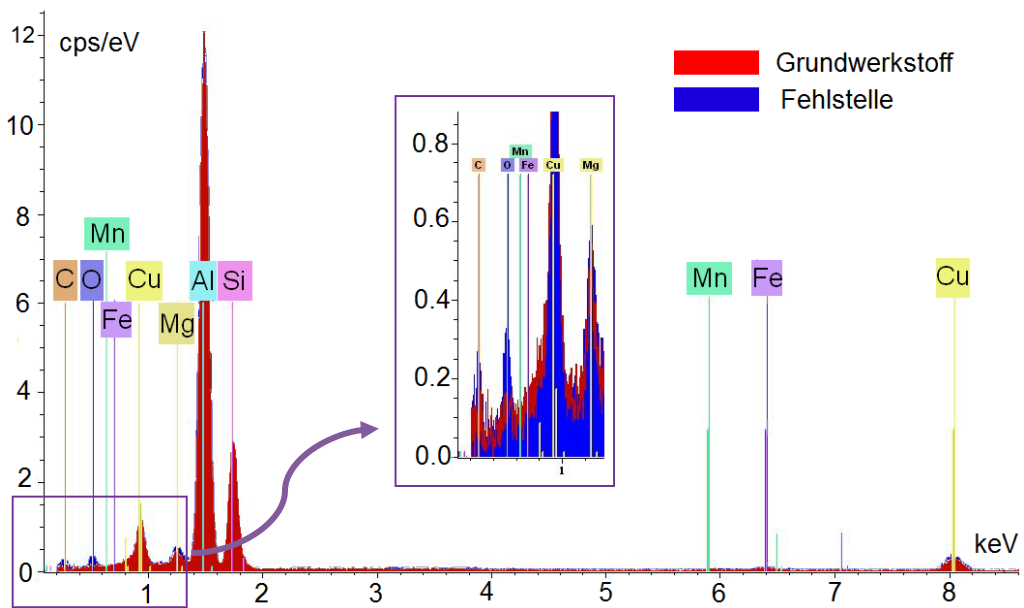


Abbildung 61: EDX-Diagramm von N63 Fehlerbild 3

## 6.3 CT-Analysen

### 6.3.1 Fehlerart 1

In der Mikro-CT Analyse zeigt sich ein starker Grauwertunterschied vom Grundmaterial zur Fehlerstelle. Die Abbildungen 62 Bild 1-3 zeigen jeweils einen Schnitt der Fehlerstellen und ein 3D-Modell, welches aus den Analyseschnittbildern erzeugt wurde. Wie in den Schnittbildern gut erkennbar wurden die beiden Bruchstücke mit geringem Abstand aneinander gelegt. Besonders in Abbildung 62 Bild 1 zeigt sich das Ausmaß der Fehlerstelle, die sich wie ein Pilzgeflecht durch das Bauteil erstreckt. Die Ausbreitung des Fehlers in die Bauteiltiefe beträgt mehrere Millimeter. Demzufolge ist bei dieser Art von Fehler nicht nur die an der Oberfläche des Bruches ersichtliche Fehlerstelle, sondern auch der darunterliegende Bereich stark geschädigt und stellt unter Belastung eine Schwächung des Bauteiles dar.

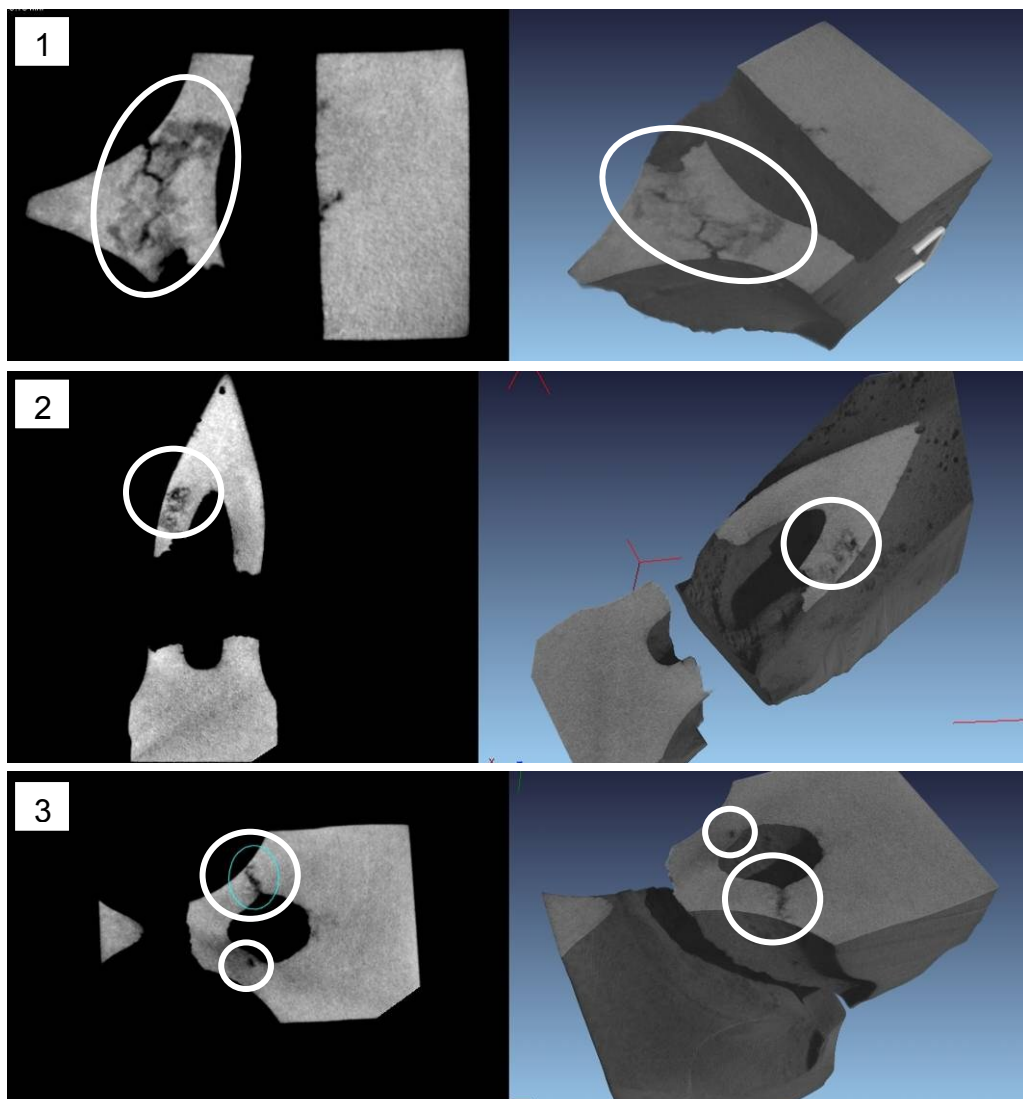


Abbildung 62: Bild 1-3: Schnitt und 3D-Modell von Fehlerstellen N63 Fehlerart 1

### 6.3.2 Fehlerart 2

In der Mikro-CT Analyse von Fehlerart 2 ist kein Grauwertunterschied der Fehlstelle zum Grundwerkstoff feststellbar. Der Fehler ist folglich im Mikro-CT nicht auflösbar. Die Stellen an denen in der visuellen Analyse der Fehler eindeutig lokalisiert wurde, wurden in den Mikro-CT Bildern eingerahmt, siehe Abbildung 63 Bild 1-3.

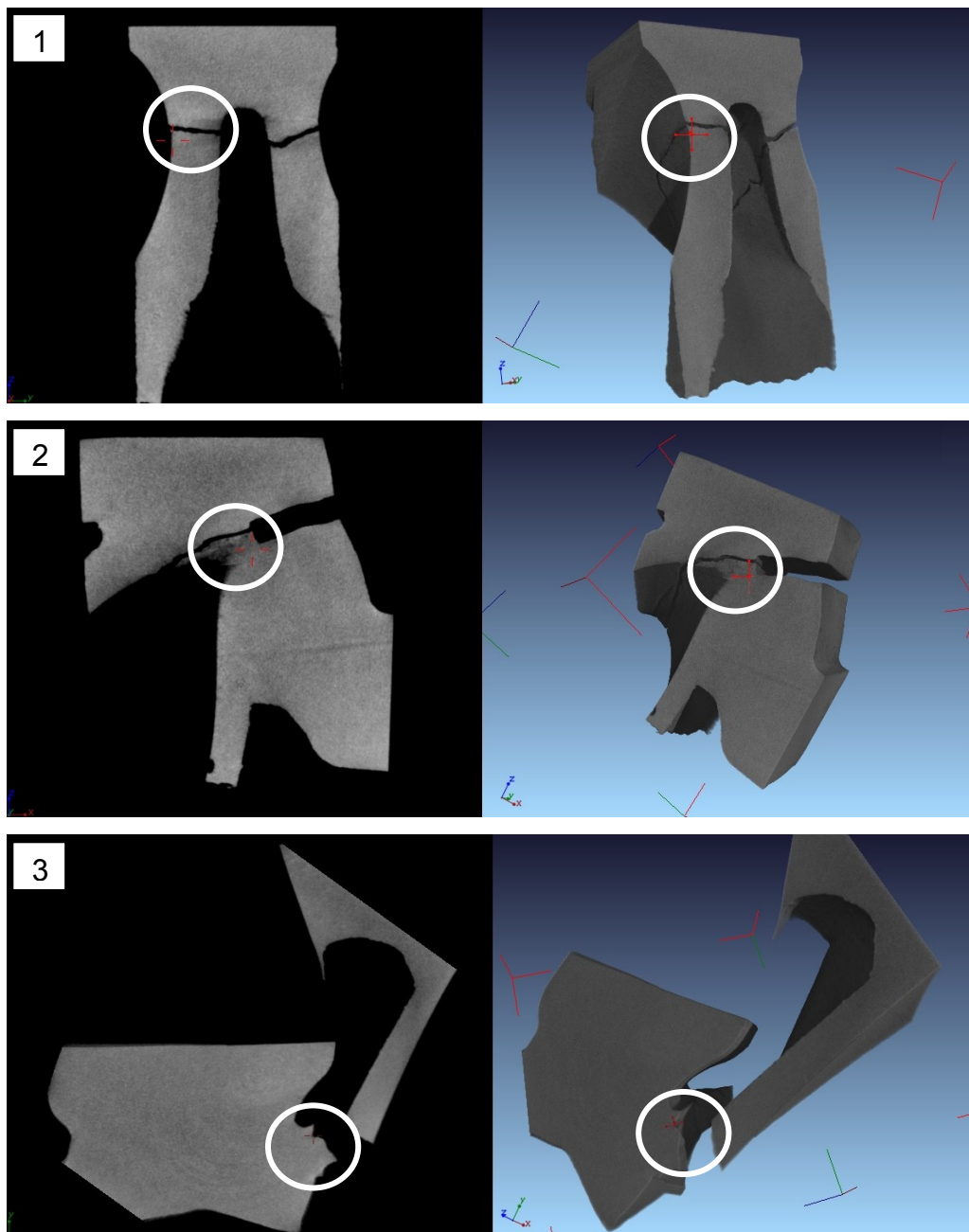


Abbildung 63: Bild 1-3: Schnitt und 3D-Modell von Fehlstelle N63 Fehlerart 2

### 6.3.3 Fehlerart 3

Das Mikro-CT-Bild der Fehlerart 3 zeigt eine deutliche Abgrenzung vom Grundmaterial und einen Hohlraum hinter der Fehlstelle. Die Bruchflächen wurden vor der Aufnahme aneinander gelegt und mit Klebeband fixiert um die Lokalisierung der Fehlstelle im 3D-Bild zu erleichtern. Die Ausbreitung des Fehlers in die Tiefe beträgt ca. 4 mm. In Abbildung 64 Bild 1-2 sind klare Dichteunterschiede von Grundwerkstoff zur Fehlstelle erkennbar.

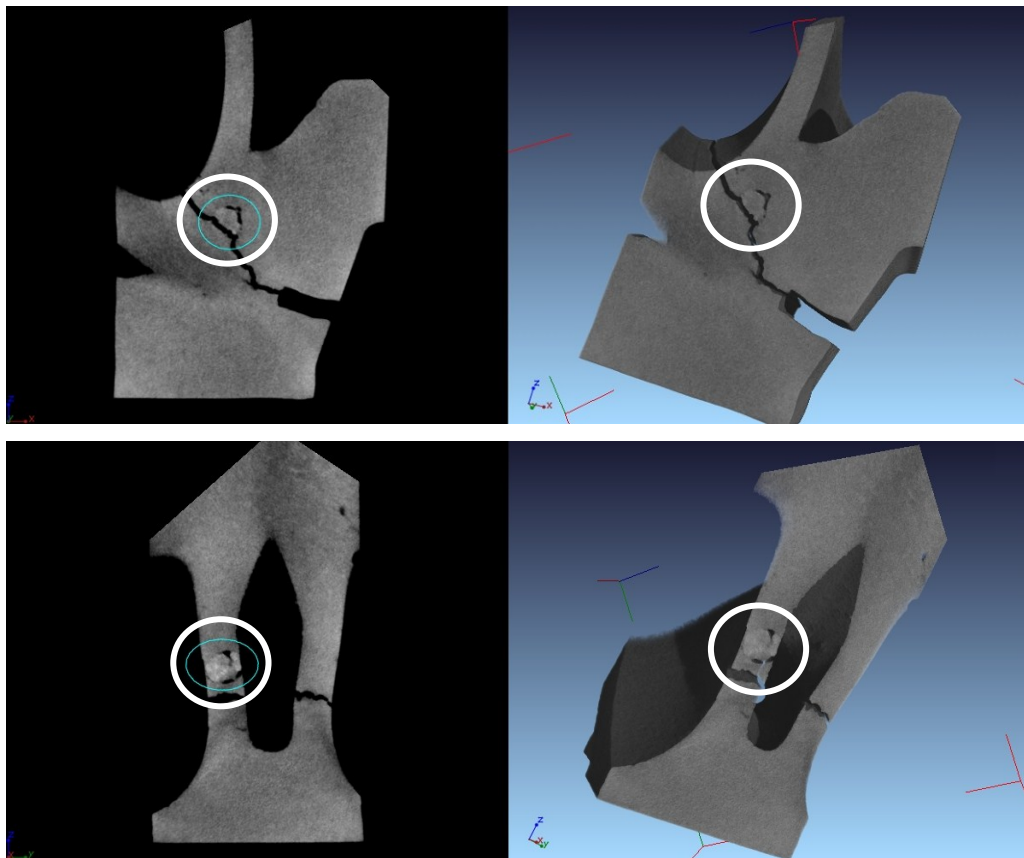


Abbildung 64: Schnitt und 3D-Modell von Fehlstelle N63 Fehlerart 3

## 6.4 Metallographie

### 6.4.1 Fehlerart 1

Die Fehlstelle (Fehlerart 1 Abbildung 44) wurde aus dem Bruchstück extrahiert und ein Schliffbild davon erzeugt. Das Fehlerbild, dargestellt in Abbildung 65, zeigt eine Anhäufung von Oxidhäuten, welche die dendritische Struktur des Bauteils unterbrechen.

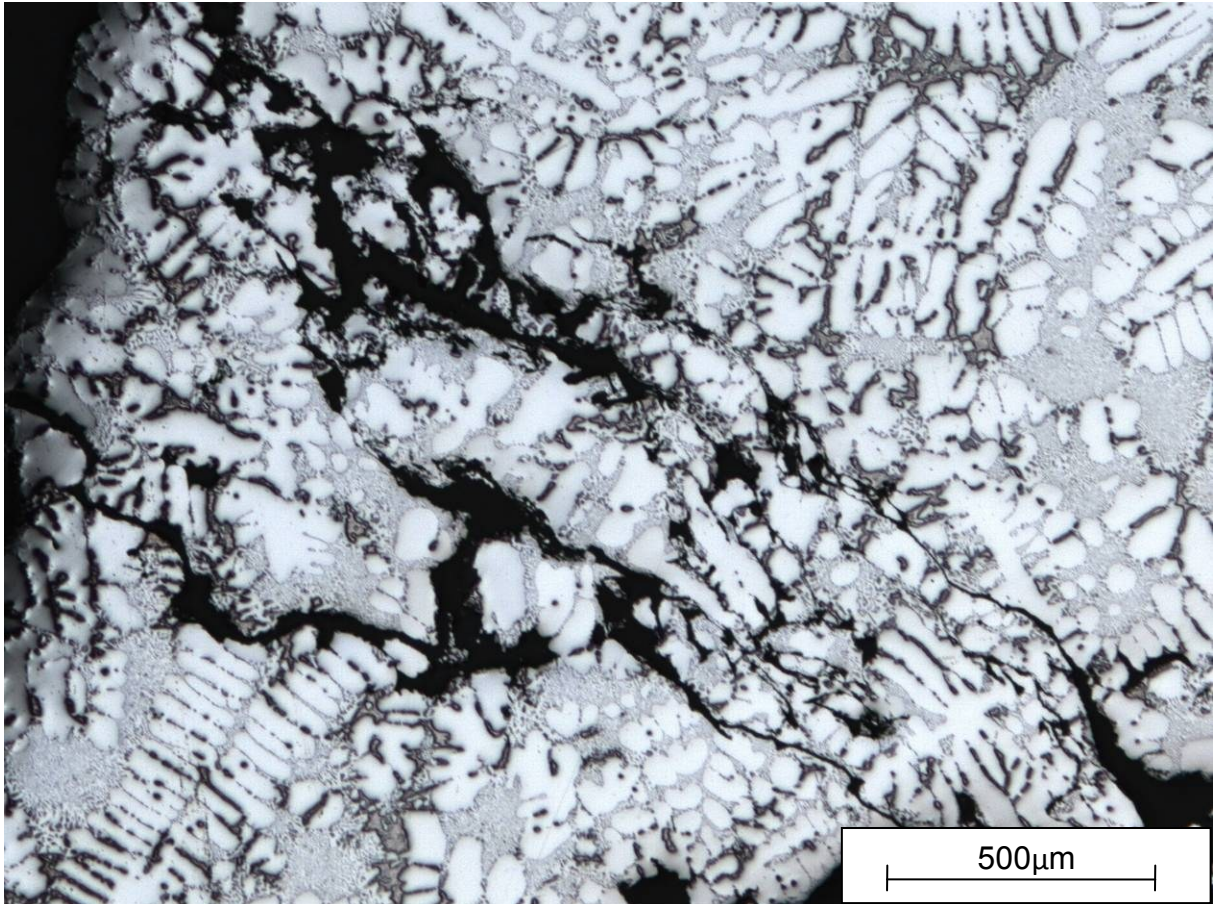


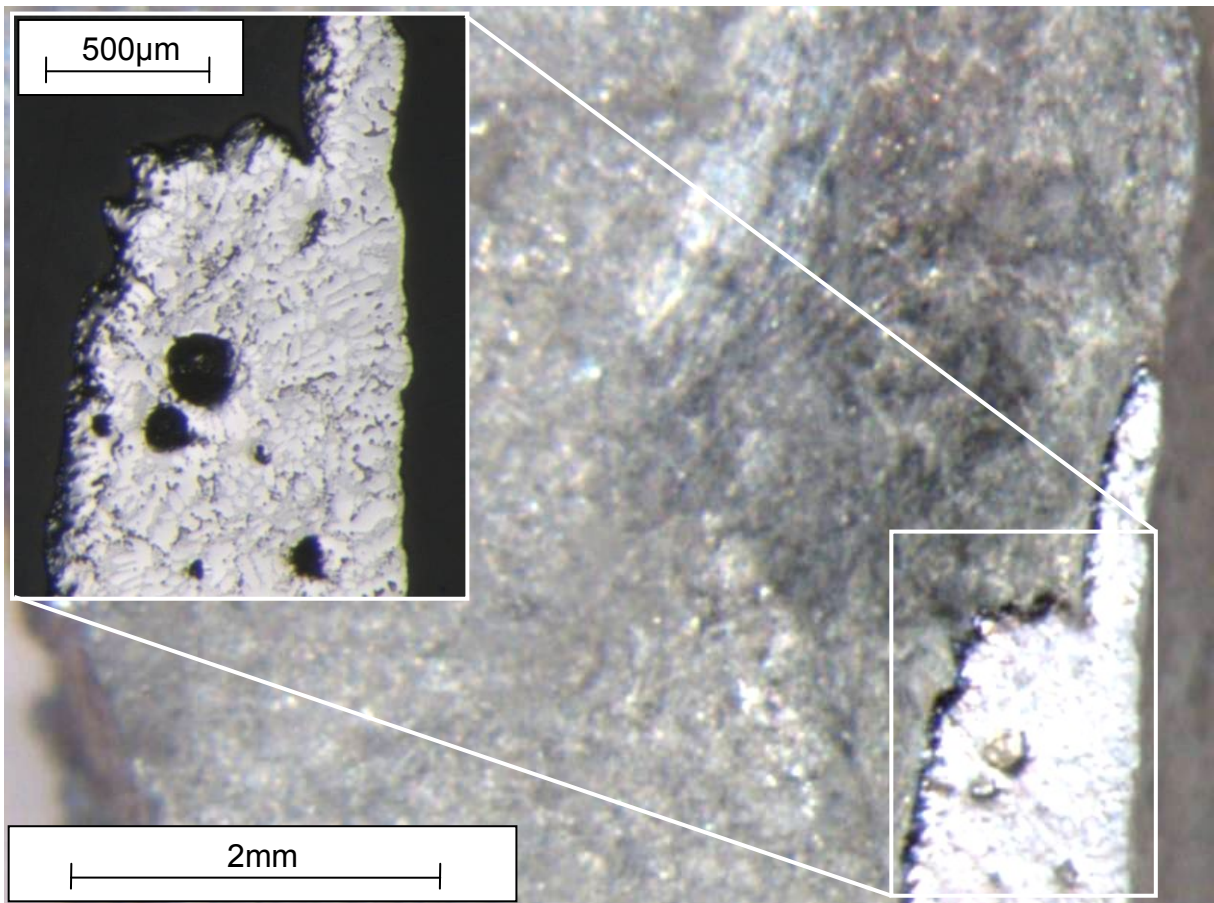
Abbildung 65: Schliffbild von N63 Fehlerbild 1

Diese Störungen im Gefüge, aufgrund der oxidischen Einschlüsse verlaufen analog zu den unter *Stand der Technik* erläuterten Theorien entlang der Korngrenzen, siehe Bild 7.

### 6.4.2 Fehlerart 2

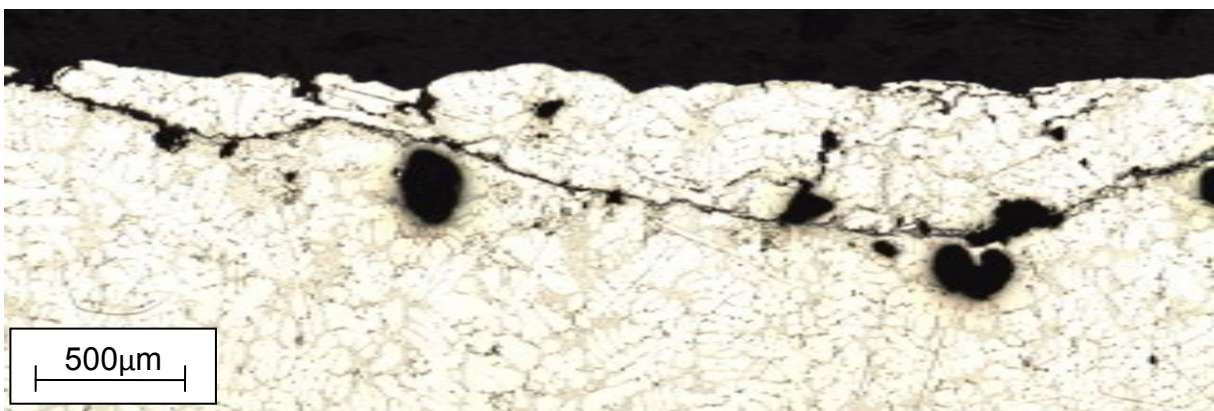
Im Schliffbild zeigt sich ein durchgehend dendritisches Gefüge, bei dem der Übergang von der Fehlstelle zum Grundwerkstoff nicht erkennbar ist. Abbildung 66 stellt eine Stereomikroskopieaufnahme eines Teilschliffes von Fehlerart 2 des ZK

N63 dar, mit eingblendeter Vergrößerung des Übergangs von Fehlstelle (dunkel) in Grundwerkstoff (hell).



**Abbildung 66: Schliffbild von N63 Fehlerbild 2**

Beim Schliffbild des ZK N20 dieser Fehlerart, ist das Gefüge ebenso deutlich unterbrochen. Es wurde im rechten Winkel zur Hauptausdehnungsrichtung des Fehlers erstellt. Das Schliffbild bestätigt auch, dass es sich hierbei um eine eingeschlossene Oxidhaut handelt. Der Bereich oberhalb der Trennlinie ist vermehrt von kleineren Oxidhäuten durchzogen.



**Abbildung 67: Schliffbild von N20 Fehlerart 1**

Das Schliffbild in Abbildung 68 zeigt einen annähernd durchgehenden Spalt von einer zur anderen Bauteilwand. Das komplette Ausmaß des Durchgangs kann mit einem Schnitt in nur einer Ebene nicht vollständig dargestellt werden.

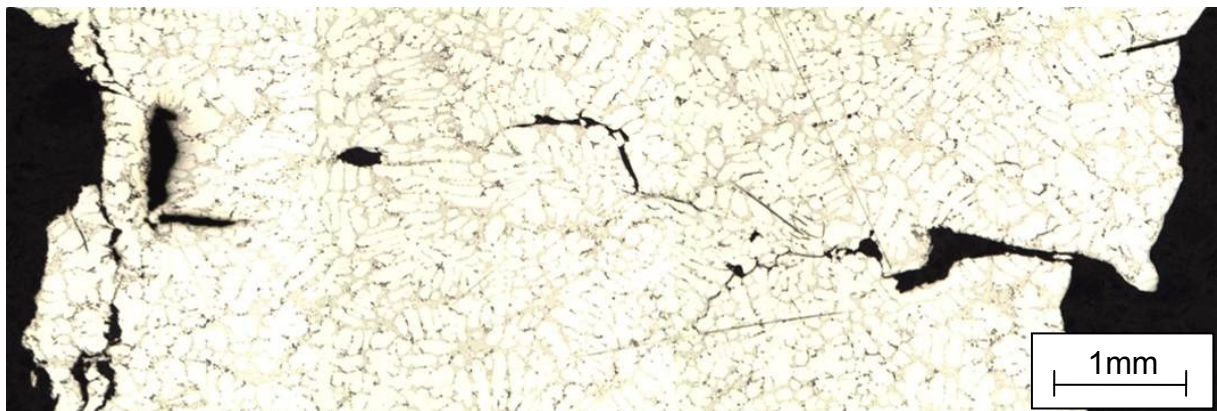


Abbildung 68: Schliffbild von N20 Fehlerbild 2

### 6.4.3 Fehlerart 3

Das Schliffbild der Fehlstelle in Abbildung 69 zeigt im Übergang von Grundmaterial auf den Fehler eine teilweise eutektische Umwandlung (Wiederaufschmelzung), was auf einen starken nachträglichen Temperaturanstieg, bzw. ein eutektisches Nachspeisen in diesem Bereich schließen lässt.

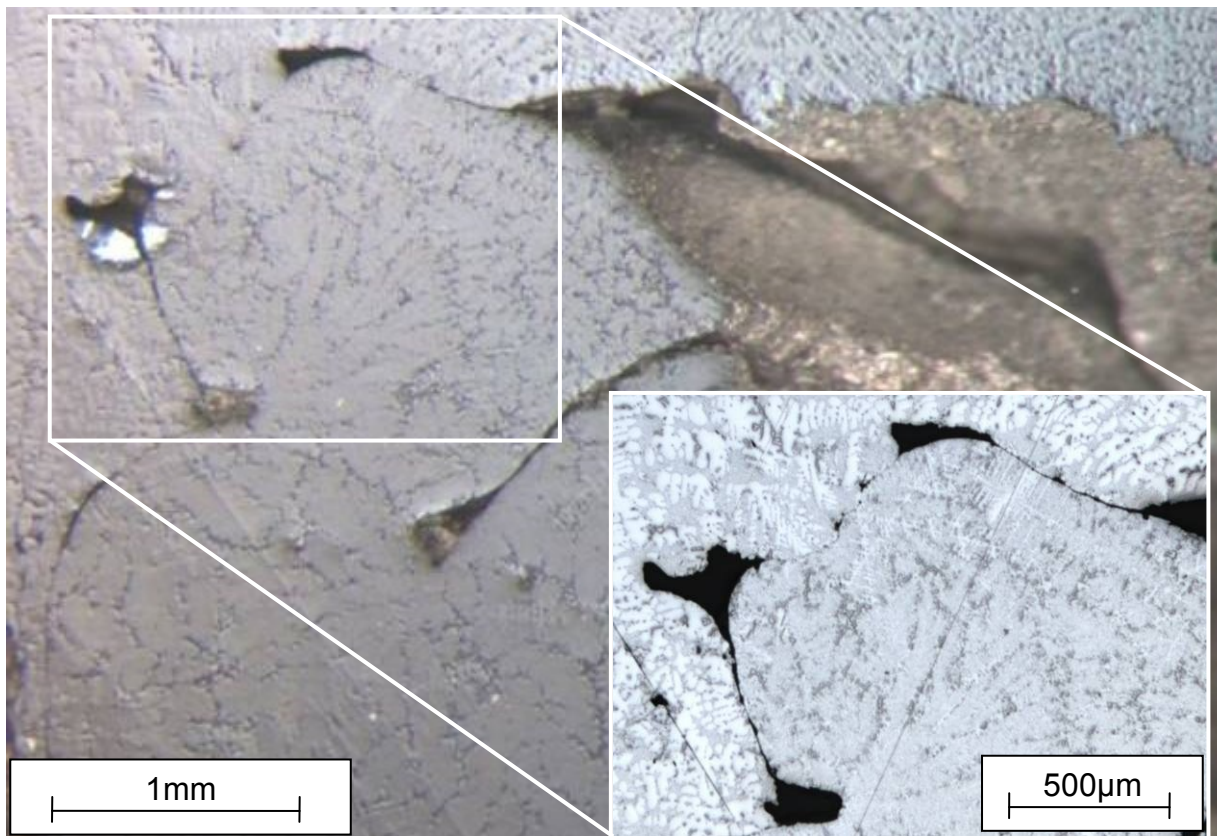





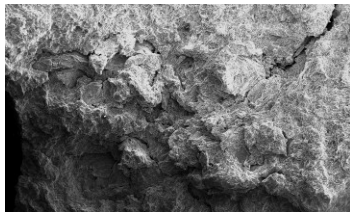

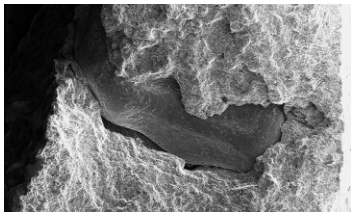
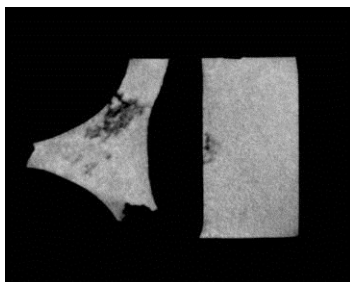
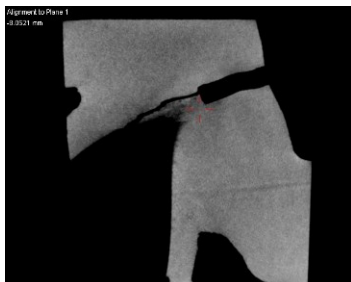
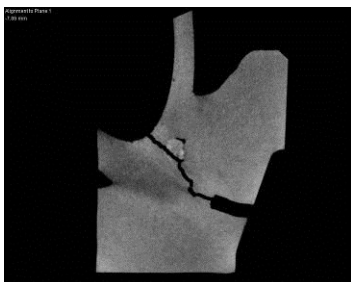
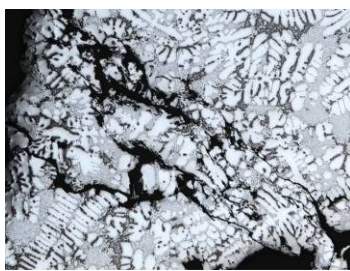
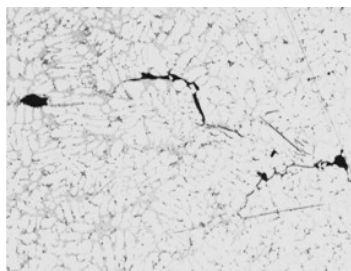

Abbildung 69: Schliffbild von N63 Fehlerbild 3



## 6.5 Zusammenfassung der Fehlerbilder

Eine zusammenfassende Übersicht der gefundenen Fehlerbilder zeigt Tabelle 4:

Tabelle 4: Übersicht über Fehlerarten

	Fehlerart 1	Fehlerart 2	Fehlerart 3
<b>Aufbruch</b>			
<b>REM</b>			
<b>EDX</b>	Stark erhöhter Sauerstoffgehalt in der Fehlstelle, teilweise Begleitelemente aus Schlacke	Leicht erhöhter Sauerstoffgehalt in Fehlstelle, ansonsten kaum Unterschied im Spektrum zu Grundstoff	Keine Unterschiede zwischen Spektrum von Fehlstelle und Grundstoff
<b>CT</b>			
<b>Mikroskopie</b>			
<b>Vorkommen</b>	<b>ZK N63: 80%</b> <b>ZK N20: 5,8%</b>	<b>ZK N63: 16,4%</b> <b>ZK N20: 94,2%</b>	<b>ZK N63: 3,6%</b> <b>ZK N20: 0%</b>
<b>Mögl. Entstehung</b>	Einziehen von Verunreinigung aus Dosiereinheit bzw. Injektor, Entstehung bereits beim Schmelzvorgang	Entstehung aufgrund von Turbulenz oder Lufteinschluss, Strömungsbedingt, Entstehung während Gießvorgang	Mögliche Entstehung aufgrund von Gasentwicklung (z.B. Kerngas) und Zerfall der Gasblase (siehe Theorie Kap. 3.3.2)

## 6.6 Statistische Auswertungen

### 6.6.1 Ergebnisse der Dichtheitsprüfung

In Abbildung 70 werden die Ergebnisse der Dichtheitsprüfung des ZK N63 dargestellt. Die Fehlerorte, bzw. die Lage der Undichtheit, sind auf die Ein- und Auslassseite verteilt. Es lässt sich jedoch eine stärkere Tendenz der Undichtigkeit zur Einlassseite hin feststellen. Die Fehler in den Kanalausßenwänden überwiegen über die innenliegenden Fehler.

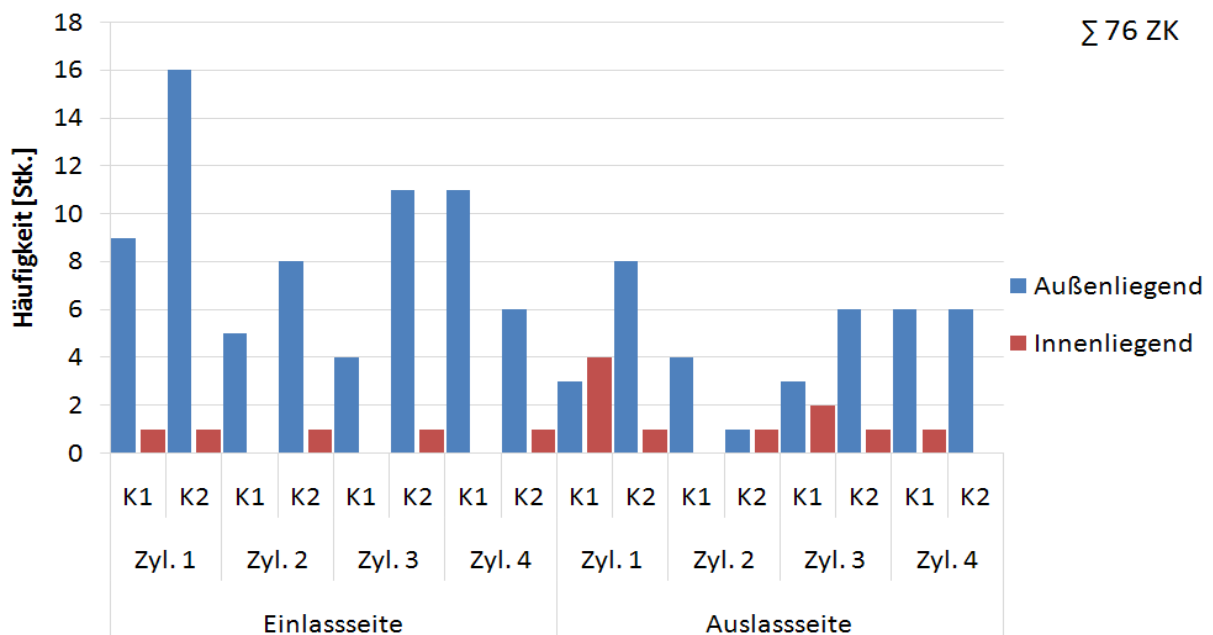
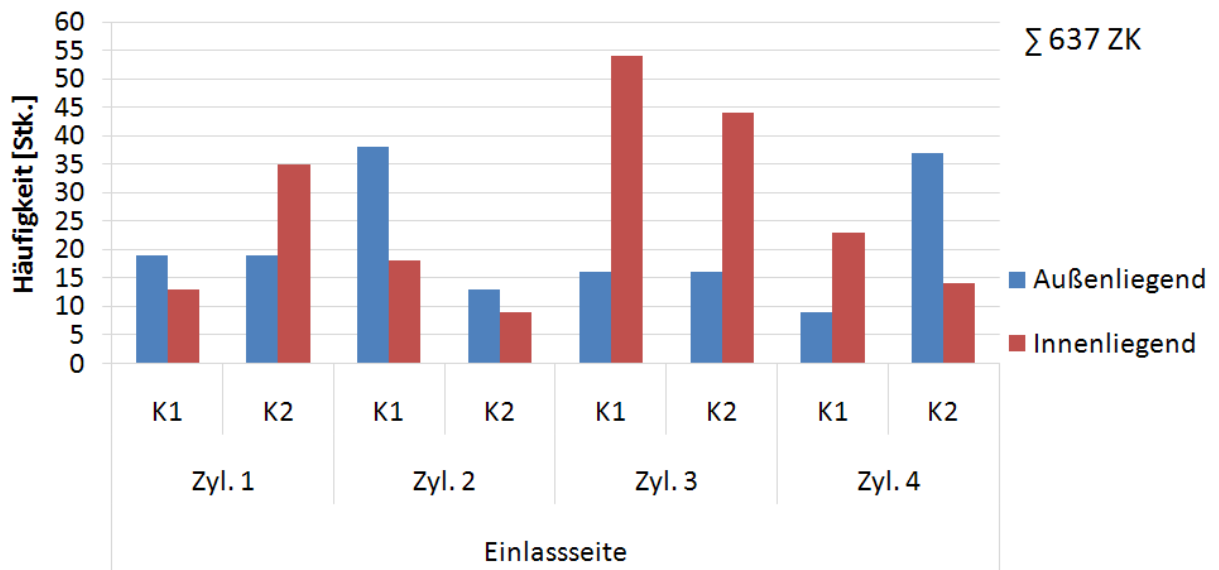


Abbildung 70: Ergebnisse Dichtheitsprüfung ZK N63

Abbildung 71 zeigt die Ergebnisse der Dichtheitsprüfung des Zylinderkopfes N20. Es wird hierbei nur auf die Einlassseite des Zylinderkopfes eingegangen, da auf der Auslassseite lediglich ein einziger Fehler im Gesamtlos gefunden wurde, der statistisch hier nicht erfasst wird. Auffällig ist hierbei, dass der Anteil der innenliegenden Fehler, also jene in der Wand zwischen den Einlasskanälen, nominell größer ist, als die der außenliegenden Fehler.



**Abbildung 71: Ergebnisse Dichtheitsprüfung ZK N20**

Tabelle 6 zeigt die Daten, die den Diagrammen zugrunde liegen. Die Anteile der Fehlerlagen sind als Prozentsatz der jeweiligen Gesamtfehlerzahl angegeben.

**Tabelle 5: Daten der Dichtheitsprüfungen ZK N63 und ZK N20**

			N63		N20	
			Außen	Innen	Außen	Innen
Einlass	Zyl. 1	K1	9	1	19	13
		K2	16	1	19	35
	Zyl. 2	K1	5	0	38	18
		K2	8	1	13	9
	Zyl. 3	K1	4	0	16	54
		K2	11	1	16	44
	Zyl. 4	K1	11	0	9	23
		K2	6	1	37	14
Auslass	Zyl. 1	K1	3	4		
		K2	8	1		
	Zyl. 2	K1	4	0		
		K2	1	1		
	Zyl. 3	K1	3	2		
		K2	6	1		
	Zyl. 4	K1	6	1		
		K2	6	0		
<b>Summe</b>			<b>107</b>	<b>15</b>	<b>167</b>	<b>210</b>
<b>Prozent von Gesamt</b>			<b>87,7</b>	<b>12,3</b>	<b>44,3</b>	<b>55,7</b>

### 6.6.2 Ergebnisse der Quasar-Prüfung

Wie bereits im Kapitel „Experimentelle Methoden“ bei der Beschreibung der Quasar Test-Methodik erwähnt wurde (siehe S. 30), schlägt Quasar für die Auswertung der Resonanzfrequenzbänder verschiedene Sortiervarianten vor. Diese unterscheiden sich in der Zusammensetzung der einzelnen Muster und liefern demnach unterschiedliche Ergebnisse. Mit dem Wissen über den tatsächlichen Qualitätszustand einiger Teile kann eine Abschätzung über die Qualität der restlichen Teile gegeben werden. Für die Analyse der 67 Zylinderköpfe wurden 12 bekannte Gutteile und 6 bekannte Schlechteile aus dem Los ausgewählt und der Quasar-Software als Grundlage für die Analyse zur Verfügung gestellt. Auf Basis dieser Daten wurden 20 unterschiedliche Sortiervarianten gefunden. Die Sortierung der Auswertevarianten nach Gesamtübereinstimmung mit der Dichtheitsprüfung ist in Abbildung 72 dargestellt. Die Sortiervarianten wurden zur besseren Übersichtlichkeit mit den Buchstaben A-J, anstelle der ursprünglichen Nomenklatur, betitelt. Sortiermethode A, B und C haben die höchste Gesamtübereinstimmung mit den Dichtheitsprüfungsergebnissen. Beim Vergleich mit den Gutteilen war die Sortiervariante G, und beim Vergleich mit den Fehlerteilen die Sortiervariante A jene mit der höchsten Übereinstimmung.

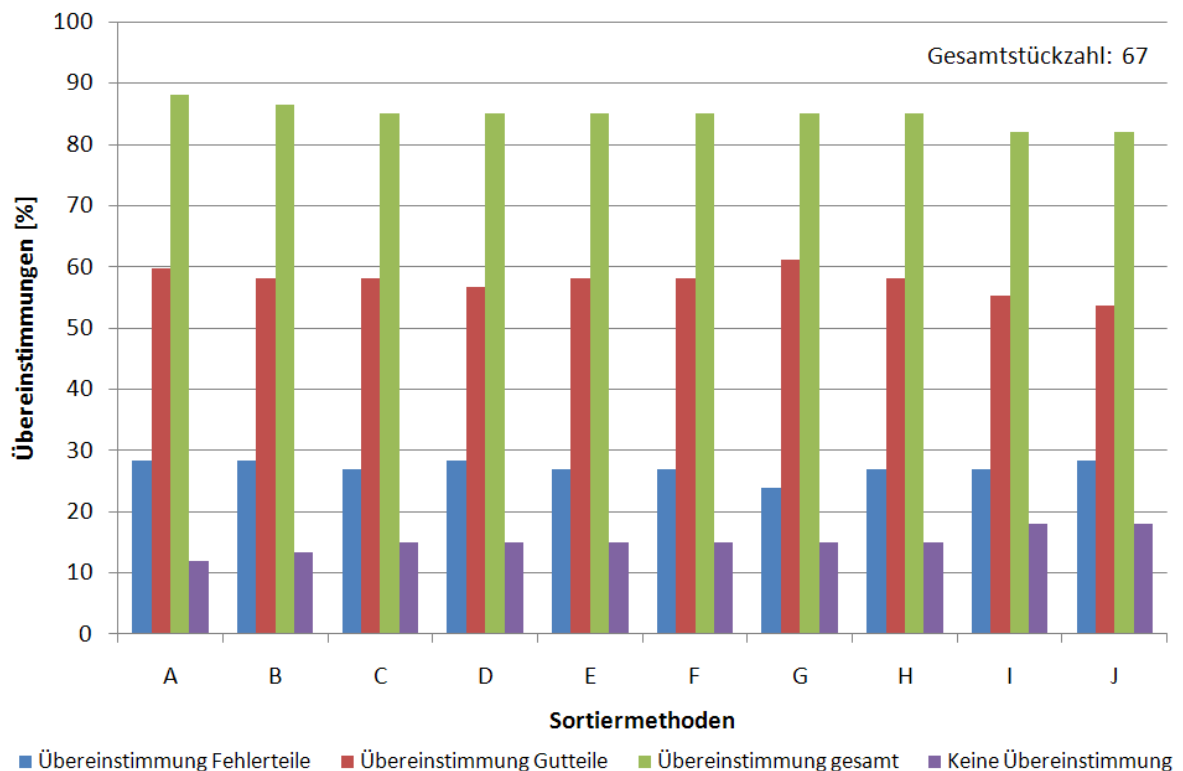


Abbildung 72: Auswertung nach Übereinstimmung mit der Dichtheitsprüfung ZK N63

Tabelle 7 zeigt die Reihung der Sortiervarianten nach höchster Übereinstimmung mit der Dichtheitsprüfung. Eine reine Übereinstimmung in allen drei Bereichen ist bei keiner Sortiervariante feststellbar.

**Tabelle 6: Sortierqualität nach bestem Ergebnis**

	Gesamt	Gut	Schlecht
1	A	G	A
2	B	A	B
3	C	B	D
4	D	C	J
5	E	E	C
6	F	F	E
7	G	H	F
8	H	D	H
9	I	I	I
10	J	J	G

Die prozentuellen Werte der Sortiervarianten A-C aus Tabelle 7 sind in Tabelle 8 dargestellt.

**Tabelle 7: Sortierqualität der besten drei Ergebnisse im Detail**

	Übereinstimmung Fehlerteile [%]	Übereinstimmung Gutteile [%]	Keine Übereinstimmung [%]	Übereinstimmung gesamt [%]
A	28,4	59,7	11,9	88,1
B	28,4	58,2	13,4	86,6
C	26,9	58,2	14,9	85,1

Trotz der hohen Gesamt-Übereinstimmungen von jeweils mehr als 85% konnten in allen drei Sortiervarianten in ca. 10-15% der Fälle keine Übereinstimmung gefunden werden. In Tabelle 9 sind die Werte der gefundenen Gut- bzw. Fehlerteile der Quasar-Prüfung im Vergleich zur Dichtheitsprüfung (DP) dargestellt. Die Dichtheitsprüfung liefert ein eindeutiges Ergebnis über die Dichtheit des Bauteils und somit eine klare Vorgabe ob das Bauteil Ausschuss ist oder nicht. Bei der Quasar-Prüfung wurden weniger fehlerhafte Teile (ca. 8%) gefunden als in der Dichtheitsprüfung, was im Prozess zur Weiterbearbeitung fehlerhafter Teile führen würde.

Tabelle 8: Vergleich Dichtheitsprüfung - Quasar Prüfung

	DP	A	B	C
Gutteile	19	27	28	27
Fehlerteile	48	40	39	40

### 6.6.3 Zusammenhang von Fehlerhäufigkeit, Fehlerart und Fehlergröße

In linken Teil von Abbildung 73 zeigt sich die Häufigkeit der Fehlerarten 1-3, die bei der Analyse des ZK N63 gefunden wurden, der linke Teil von Abbildung 74 jene des ZK N20. Der rechte Teil dieser beiden Abbildungen gibt Auskunft über die Größenverteilung der gefundenen Fehlstellen. Beim Zylinderkopf N63 wurden zum Großteil Oxide der Fehlerart 1 gefunden. Mehr als die Hälfte dieser Fehlerfunde hatten eine Größe unter 1 mm bzw. ein Viertel zwischen 1 und 3 mm.

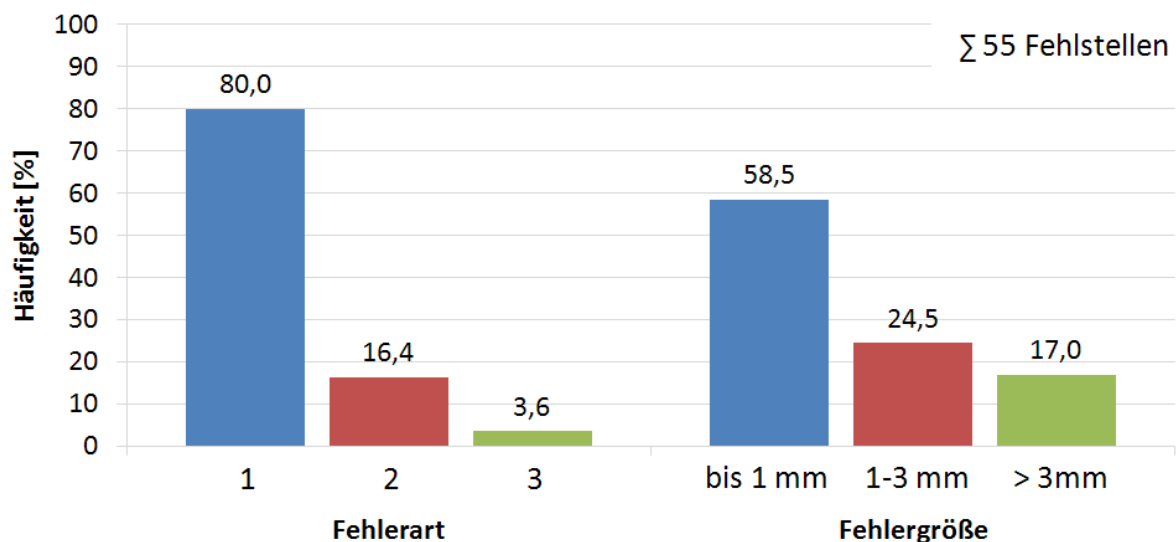


Abbildung 73: Häufigkeiten der Fehler nach Art (Fehlerbild) und Größe, ZK N63

Beim Zylinderkopf N20 wurden fast ausschließlich Fehler der Art 2 gefunden. Die am häufigsten gefundene Fehlergröße lag zwischen 1 und 3 mm mit einem Gesamtanteil von circa zwei Drittel. Ein Drittel der Fehler hatte eine Größenausdehnung unter 1 mm.

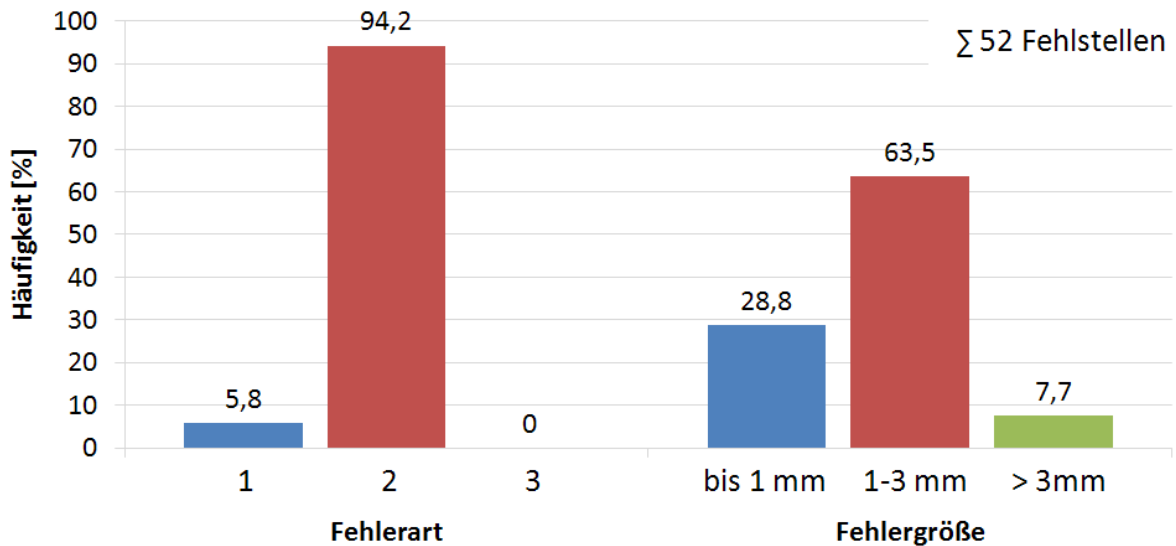


Abbildung 74: Häufigkeiten der Fehler nach Art (Fehlerbild) und Größe, ZK N20

### 6.6.4 Zusammenhang von Fehlerhäufigkeit und Fehlerort

Das Diagramm in Abbildung 75 zeigt die Häufigkeit der Oxidfunde nach deren Lage im Zylinderkopf N63. Auffällig ist besonders, dass die größte Anhäufung durchgehend im Bereich Mitte, also der Wand zwischen den beiden Kanälen gefunden wurde. Die Zahl der Oxid-Funde ist, mit Ausnahme von Zylinder 4 Links und Mitte, jeweils auf der Auslassseite deutlich höher.

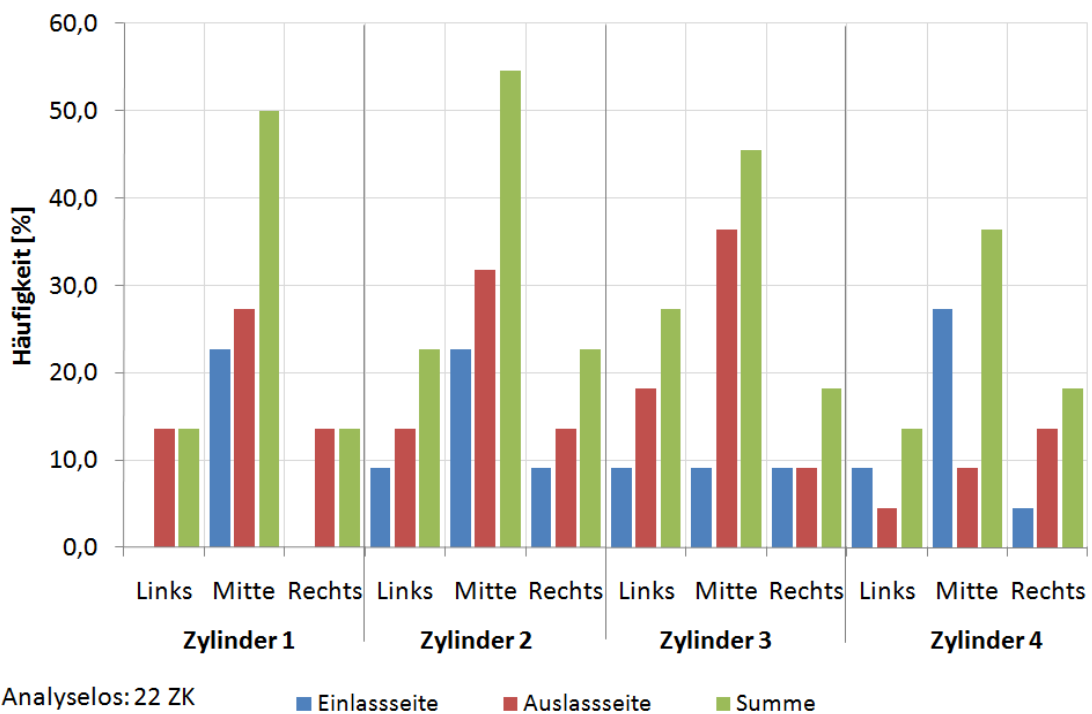
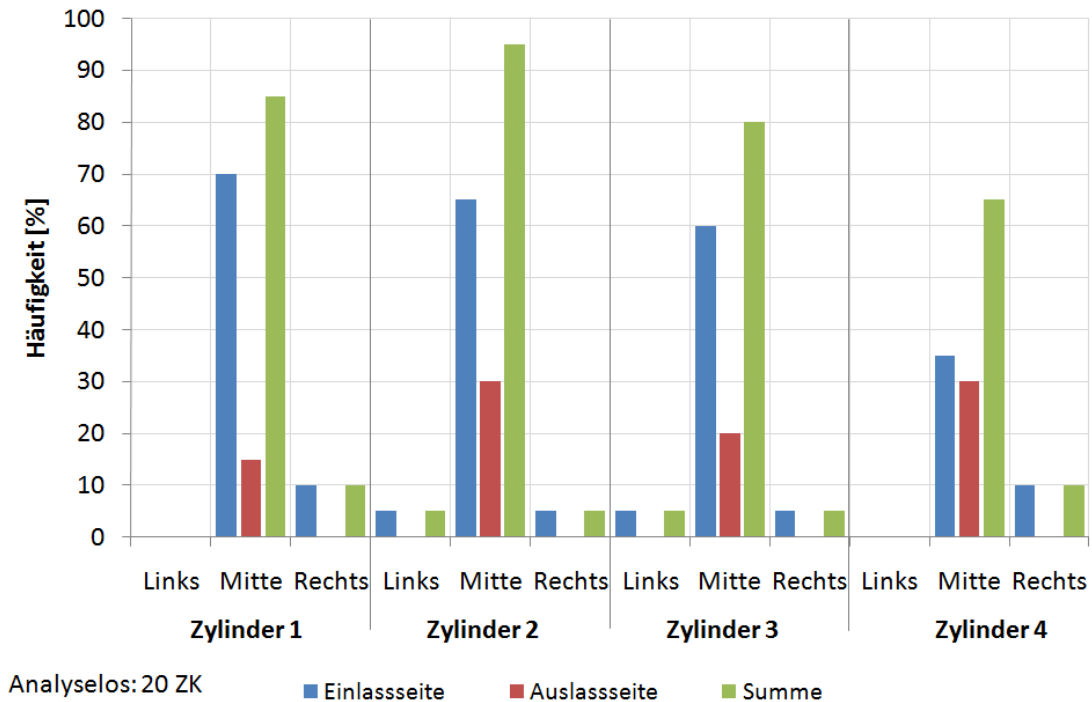


Abbildung 75: Häufigkeit der Oxide nach Lage ZK N63



**Abbildung 76: Häufigkeit der Oxide nach Lage ZK N20**

Abgesehen von der Detail-Geometrie sind die Bezeichnungen der Fehlerorte beim ZK N20 schematisch gleich wie beim ZK N63 (analog Abbildung 17 [Zylinder 1-4, Kanal 1-2, Links, Mitte, Rechts]). Das Diagramm in Abbildung 76 zeigt die Häufigkeit der Oxidfunde in Bezug zu deren Lage beim ZK N20. Es ist erkennbar, dass hierbei, die Randbereiche Links und Rechts kaum von Oxiden betroffen sind. Der Hauptanteil der Oxide befindet sich im Bereich Mitte, also in der Wand zwischen den beiden Kanälen. Überwiegend betroffen die Einlassseite des Zylinderkopfes.

### 6.6.5 Rückschluss auf Gießparameter

In Tabelle 10 ist ein Auszug aus den Gießdaten der analysierten Teile des ZK N63 dargestellt. Sie zeigt die drei für die Analysen herangezogenen Gießtage und die verwendeten Gießparameter. Konstante und für die Auswertung nicht relevante Daten wurden ausgeblendet. In der Spalte „Zustand“ wurde eine Qualitätskomponente eingeführt, die sich aus den Ergebnissen des Teileaufbruchs ergibt. In der Spalte Dichtheitsprüfung (DP) wurde das Ergebnis der Dichtheitsprüfung eingetragen. Es fällt auf, dass die Qualität der gegossenen Teile beim ersten Gießtag am besten war, und sich zum dritten Gießtag hin verschlechtert. Die Anzahl der i.O.-Teile war am ersten Gießtag am höchsten, an den anderen Gießtagen waren fast nur noch oxidgeschädigte Teile.



Tabelle 9: Fehlerhäufigkeit in Abhängigkeit der Gießparameter

Gießdatum	Teilenummer	Zustand	DP	Befüllzeit [s]	Grundplattentemperatur [°C]	Grundplattentemperatur Mittelwert [°C]	Seitenteiltemperatur Mittelwert [°C]	Füllstand Speiser [mm]	Zeit Kokille geschlossen [s]	T Ofen [°C]
17.02.2009	5	Oxidfrei	-	19,5	135,8	170	140	-20	210	710
	7	Oxidfrei	J	19,5	142,8			-20	210	
	11	Oxidfrei	N	19,5	143,9			-20	210	
	12	Oxidfrei	N	19,5	144			-20	210	
	17	Oxidfrei	J	20	164,6			-20	210	
	20	Oxidfrei	J	20	145,5			-20	210	
	21	wenig Oxide	J	20	168,7			-30	210	
	22	wenig Oxide	J	22,5	159,5			-15	210	
20.03.2009	1	wenig Oxide	N	22,5	90	175	127	-35	190	710
	4	viele Oxide	N	24	131			-17	190	
	5	Oxidfrei	N	24	137			-18	190	
	6	Oxidfrei	-	26	108			-40	190	
	7	viele Oxide	N	28	111			-30	190	
	8	viele Oxide	N	30	123			-22	190	
	9	viele Oxide	J	30	134			-17	190	
	10	viele Oxide	N	30	140			-15	190	
	15	viele Oxide	N	30	148			-8	190	
	16	viele Oxide	N	30	148			-9	190	
23.03.2009	7	wenig Oxide	N	30	156	158	125	-26	190	710
	9	Oxidfrei	J	30	157			-25	190	
	12	wenig Oxide	N	30	133			-31	190	
	23	viele Oxide	N	30	142			-30	190	

Aus dem Vergleich der Gießdaten mit den Teileanalysen lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

- Eine höhere Befüllzeit führt zu schlechteren Bauteilen. Diese wird durch die Stopfenöffnungszeit gesteuert und sollte unter 25 Sekunden gehalten werden. Ein Grund dafür ist die Möglichkeit der Vorerstarrung auf der Kokille bei zu langsamer Stopfenöffnung, sowie das einziehen von Verunreinigungen aus der Dosiereinheit.
- Bei steigenden Seitenteil- und Grundplattentemperaturen ist eine Tendenz hin zu fehlerarmen Teilen festzustellen. Hierbei wurden die Mittelwerte über den gesamten Gießtag berechnet. Ein Grund für eine Verbesserung der Teilequalität bei höheren Kokillentemperaturen ist die langsamere Erstarrung der Schmelze sowie eine Minderung der Vorerstarrungen in der Kokille aufgrund der höheren lokalen Schmelzetemperaturen.
- Die schwankenden Speiserfüllstände haben keinen direkten Einfluss auf die Teilequalität in Hinblick auf Oxide.
- Die Dichtprüfresultate sind in 10 von 20 Fällen mit einem mittleren bis starken Oxidvorkommen übereinstimmend, zwei Bauteile wurden nicht dichtgeprüft.

## 7 Simulation

Die Simulationen der ICA-Gießvorgänge wurden mit dem Programm FLOW-3D® durchgeführt. Das Programm arbeitet nach der Methode der Finiten Differenzen und auf Basis der *Volume of Fluid* (VOF)-Methode. Der eigentliche Unterschied zu herkömmlichen Softwarelösungen für die Simulation von Gießvorgängen, wird bei der Betrachtung des Ergebnisses deutlich. Flow-3D® beherrscht nämlich nicht nur die VOF-Methode sondern auch das sogenannte *Free Surface Modeling*, welches ein realitätsnahes Flüssigkeits- bzw. Schmelzeverhalten simuliert. Die Darstellung der Ergebnisse von z.B. Strömungssimulationen ist daher in Flow-3D® optisch ansprechender und möglicherweise realitätsnaher, was sich jedoch negativ auf die Simulationsdauer auswirkt. Herkömmliche Simulationsprogramme werden deshalb vorzugsweise für stationäre Berechnungen, wie Wärmeübergang, Temperatur- und Geschwindigkeitszustände zu bestimmten Füllzeiten verwendet. Entgegen dem wird FLOW-3D® für realitätsnahe Strömungs- und Temperaturverlaufssimulationen angewandt. Ein Vorteil von FLOW-3D®, der besonders bei der Simulation von ICA zum Tragen kommt, ist, dass jedes beliebige 3D-Modell als Schmelze-Inlet angenommen werden kann und sich dieses auch während des Gieß- bzw. Simulationsvorganges bewegen kann. Des Weiteren können STL-Modelle von Partikeln in der Schmelze bewegt werden, sowie dynamische Abschätzungen, wie z.B. Dauer des Luftkontaktes der Schmelze, gefunden werden.

Die in Tabelle 10 dargestellten Simulationsziele wurden verfolgt:

**Tabelle 10: Simulationsthemen und –ziele**

<b>Thema</b>	<b>Ziel</b>
Strömungs- und Temperatursimulation	Strömungs- und Temperaturverhalten des ICA-Verfahrens, mit Augenmerk auf mögliche prozessbedingte Fehlerquellen
Fehlervorhersage	Verifizierung Erstarrungsverhalten in Hinblick auf Vorerstarrungen, Fehler durch Oxidbildung, Strömungseffekte

### 7.1.1 Strömungs- und Temperatursimulation

Für die Strömungssimulation des Injektorcasting wurden eigene Datenmodelle erstellt, die auf einen bzw. zwei Zylinderbereiche reduziert wurden. Hauptgrund ist die Verkürzung der Simulationszeit. Für die Abschätzung des Einflusses der Injektorform, Ausfließgeschwindigkeit, etc. reichen Simulation im Einzylinder. Gilt es den Zusammenhang bzw. die Beeinflussung der Injektoren untereinander festzustellen sind Simulationen von zumindest zwei Zylinderabschnitten notwendig. Die in den Abbildung 78 a-d. dargestellten Simulationen zeigt das Strömungsbild von zwei Zylinderabschnitten beim Beginn des Gusses eines Zylinderkopf N20 mittels ICA.

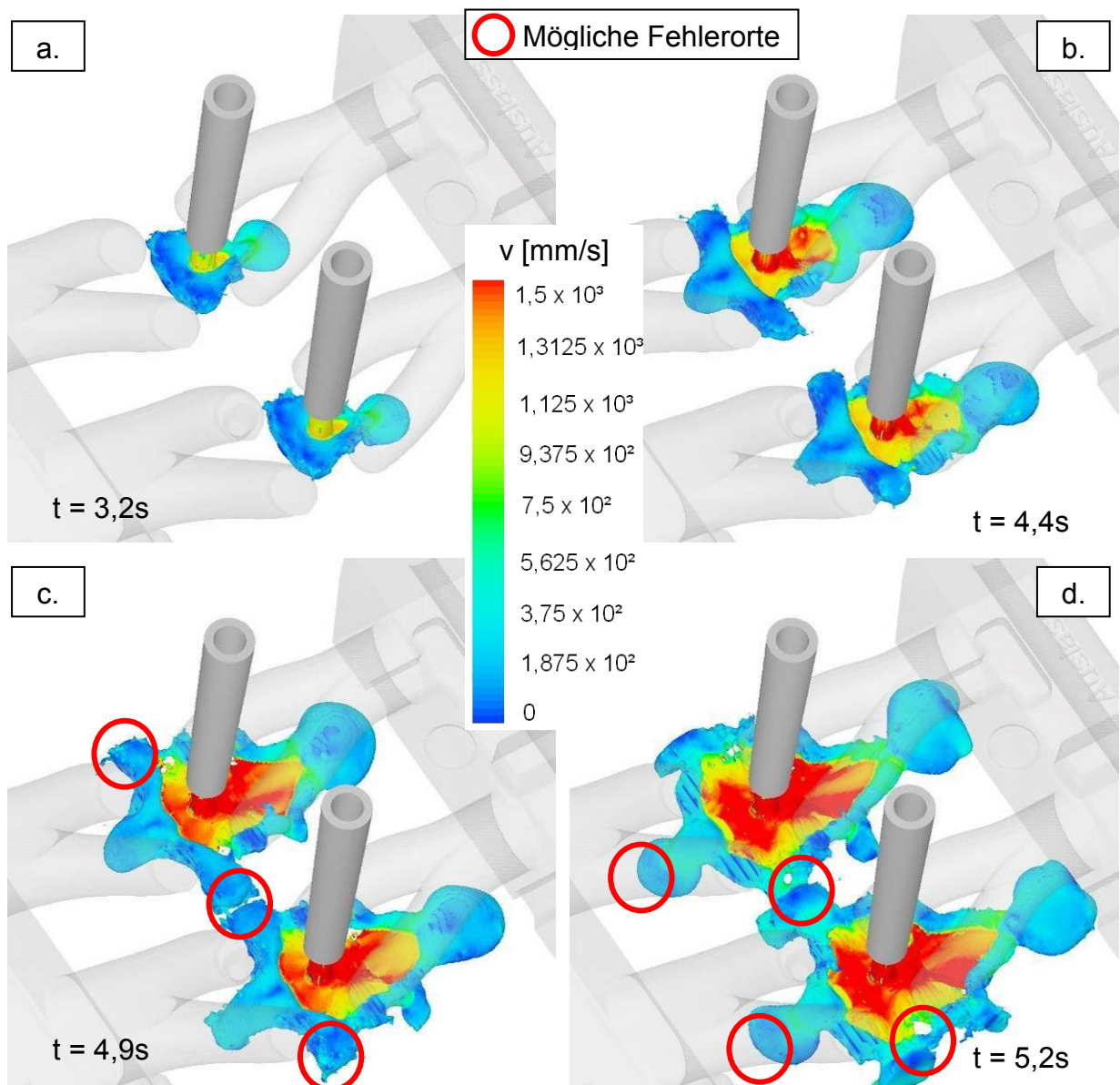


Abbildung 77: a-d. Strömungssimulation ICA 2-Zylinder

Im Zuge der Strömungssimulation können Falschfarbbilder erstellt werden. Diese geben je nach Einstellung Auskunft über z.B. Strömungsgeschwindigkeit oder Temperaturverlauf während des Gießens. Abbildung 79 zeigt die Temperaturverteilung in einem Schnitt durch den Zylinderkopf und den darin eingetauchten Injektor. Durch die außermittige Gießposition stellt sich auf der Auslassseite eine höhere Temperatur gegenüber der Einlassseite ein. Abbildung 80 zeigt im Vergleich dazu die Strömungsgeschwindigkeit zum gleichen Zeitpunkt.

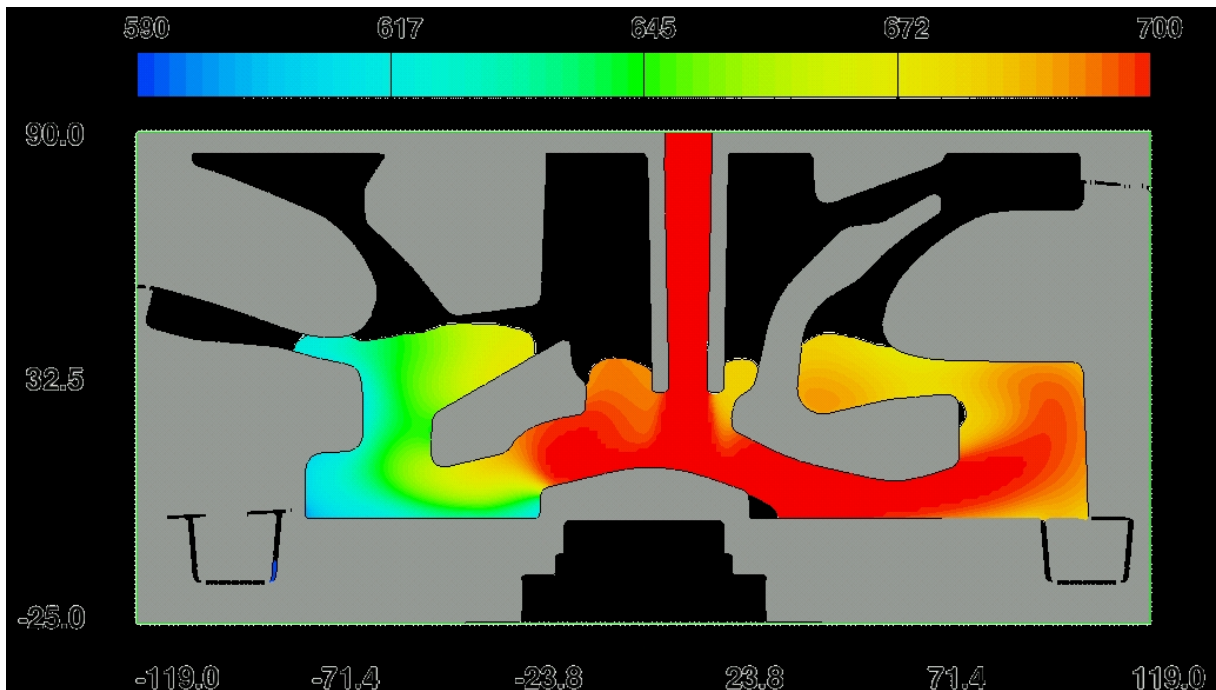


Abbildung 78: Temperatur während des Gießens [t=3,5s]

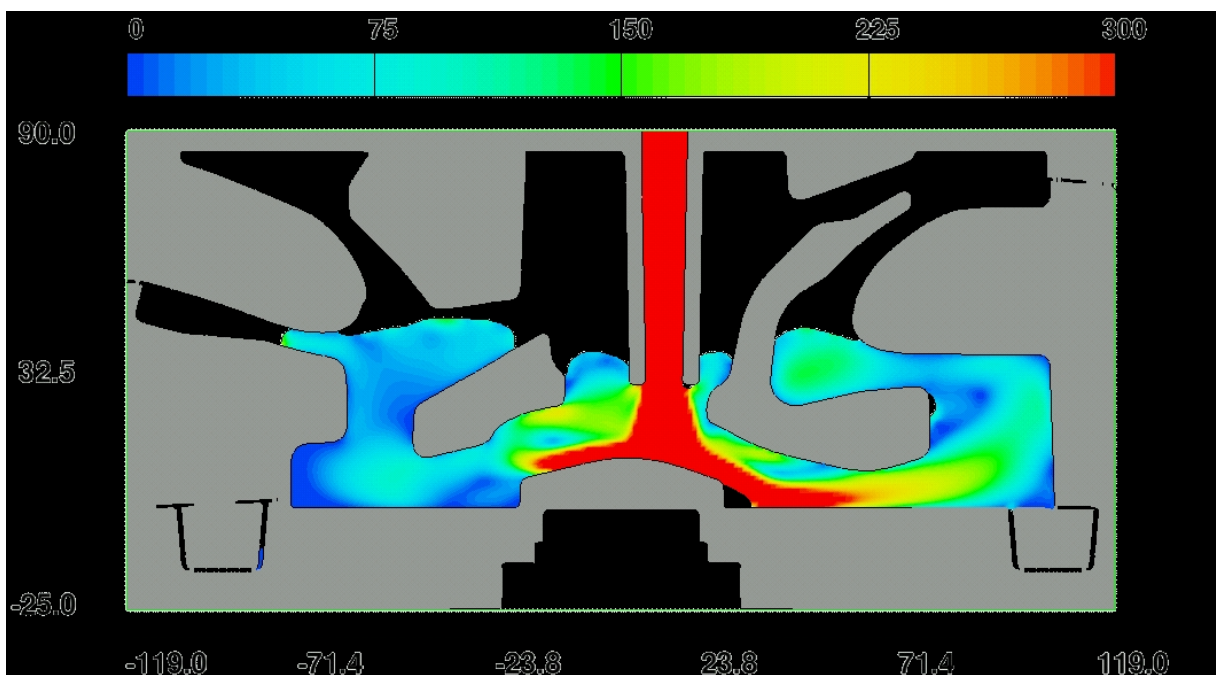
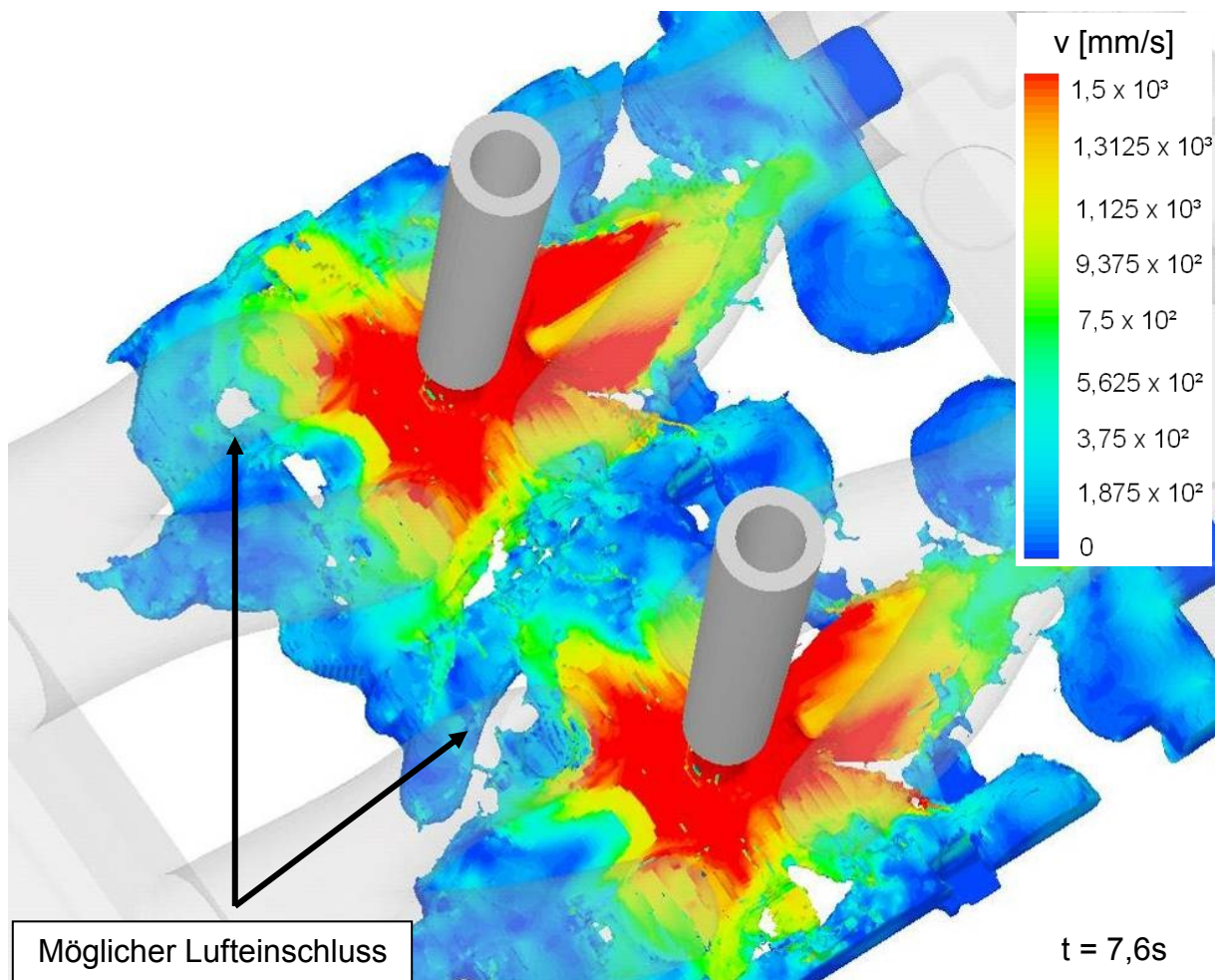


Abbildung 79: Geschwindigkeit während des Gießens [t=3,5s]



### Strömungsabriss, Blasenbildung

Die in Abbildung 82 dargestellte Strömungssimulation zeigt im Bereich der Kernlager einen Strömungsabriss. Die Kerne wurden zum Zwecke der übersichtlicheren Darstellung transparent eingeblendet. Die besagten Bereiche, die hier nicht mit Schmelze aufgefüllt sind, können im realen Guss Probleme bereiten. So ist es naheliegend, dass hierdurch eingeschlossene Luft sich in der Schmelze als Blase abbilden kann, bzw. diese während der Erstarrung aufsteigt und in Engstellen des Gusses stecken bleibt und entgast. Zurückbleiben würde eine Oxidhaut.



**Abbildung 81: Strömungssimulation mit potentiellm Fehlerart**

Grundsätzlich ist die Simulation ein probates Werkzeug, das einem die Abschätzung von Eigenschaften und Fehlern eines Gießprozesses bereits vor dem eigentlichen Abguss Zeit- und Kosteneffizient darstellt. Bei der Auswertung der Ergebnisse muss jedoch darauf geachtet werden, dass ein realer Prozess sehr viele zusätzliche Randfaktoren und Parameter beinhaltet, die für eine Simulation zu umfangreich sind, und deshalb stark von den Ergebnissen abweichen kann.

### Lokale Unterkühlung / Vorerstarrung

Das in Abbildung 83 dargestellte Simulationsbild zeigt eine im Zylinder 3 des ZK N20 festgestellte lokale Unterkühlung der Schmelze. Diese kann zu unerwünschten Vorerstarrungen in dem Bereich führen.

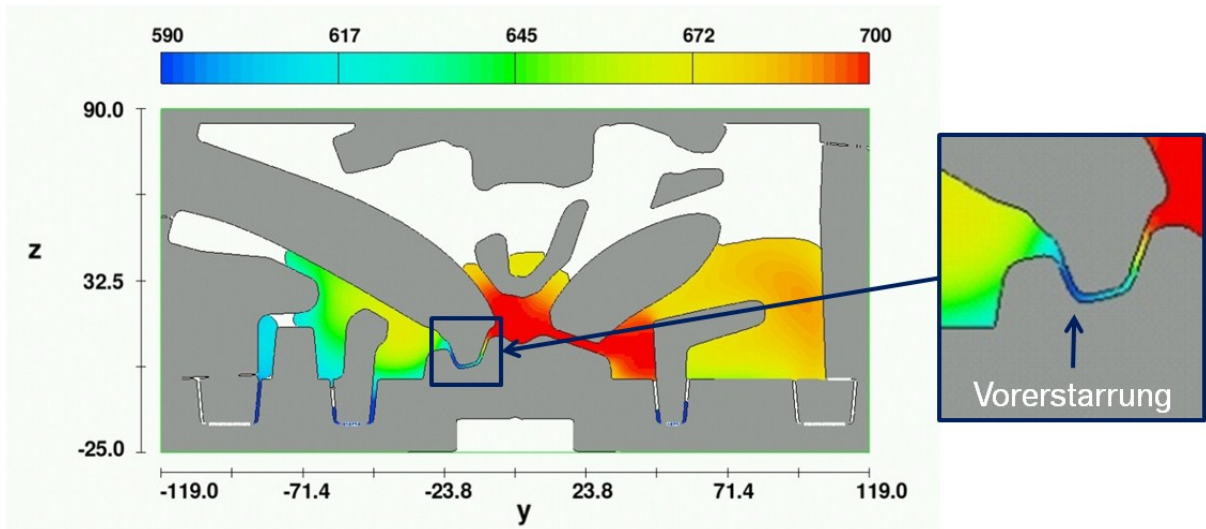


Abbildung 82: Temperatur-Simulation mit möglichem Fehlerort, ZK N20 [t=3,58s]

Der auf der linken Seite liegende Einlassbereich ist deutlich kälter als der auslassseitig gelegene Bereich auf der rechten Seite. Dieser Effekt entsteht aufgrund der auslassseitigen Position des Injektors beim Gießvorgang. Die Farben von Grün bis Türkis stellen Bereiche unter  $650^{\circ}\text{C}$  dar. Bei den blauen Bereichen wird eine Temperatur von ca.  $590^{\circ}\text{C}$  erreicht. Hier entstandene Vorerstarrungen können aufgrund von Druckveränderungen während des Gießvorganges auch in andere Bereiche transportiert werden.

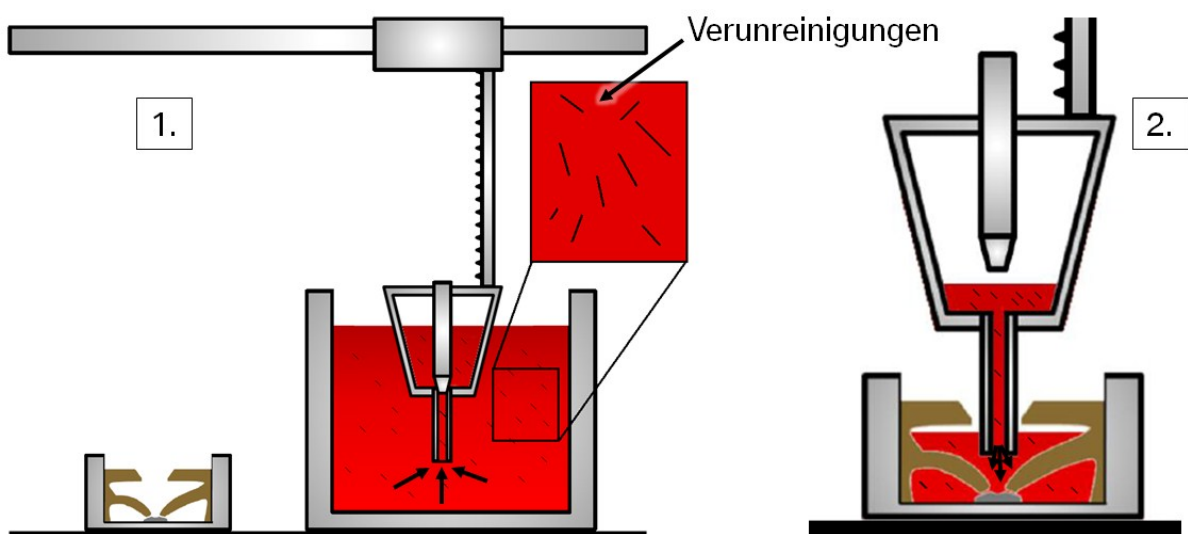
Betrachtet man vergleichsweise das Zustandsschaubild einer Aluminium-Silizium-Legierung, so befindet man sich bei einem Siliziumgehalt von 7% und Temperaturen zwischen  $577$  und  $630^{\circ}\text{C}$ , bereits einem bereits erstarrenden Bereich aus Schmelze und  $\alpha$ -Mischkristall. Durch Legierungszugaben wie Magnesium oder Kupfer können sich die Isothermen jedoch verschieben. Bei AlSi7Mg (A356) kann bei  $580^{\circ}\text{C}$  von einem Flüssiganteil von 45% ausgegangen werden. Weiters ist anzunehmen, dass sich bei geringer Durchmischung die ersten dendritischen Brücken gebildet werden.

## 8 Diskussion

Durch die systematische Analyse der Zylinderköpfe und dem Rückschluss auf die in der Literatur genannten Entstehungsursachen für Oxide, können den jeweiligen Fehlerbildern mögliche Entstehungsursachen zugeordnet werden. Im Folgenden wird auf diese Mechanismen genauer eingegangen.

### 8.1.1 Fehlerart 1 „Altes Oxid“

Wie im Kapitel „Stand der Technik“ auf Seite 14 beschrieben sind diese Art von Oxiden, nach Campbell als „alte Oxide“ benannt, harte Einschlüsse die sich im Guss als voluminöse Einschlüsse darstellen und während dem Schmelzen entstehen. Aufgrund von diversen gießereitechnisch notwendigen Arbeitsabläufen kann es zur Bildung von Oxiden in der Schmelze, bzw. zu Ablagerungen am Ofenrand und der Gießeinheit kommen. Diese Verunreinigungen, meist Korund (als Ablagerung) und Oxidhäute (in der Schwebelage), werden während des Gießvorgangs in das Bauteil eingebracht und stellen dort eine potentielle Fehlergröße dar. Bei konventionellen Gießverfahren werden solche Oxide durch Filter zurückgehalten. Beim ICA Verfahren sind aufgrund der baulichen Gegebenheiten keine Filter einsetzbar. Dies lässt den Schluss zu, dass Oxide, die beim Aufschmelzen oder beim Befüllen der Dosiereinheit entstehen, ungehindert ins Gussstück eingebracht werden können, schematisch dargestellt in Abbildung 84. Während des Gießvorganges (2) können sich ebenso Ablagerungen vom Stopfen bzw. dem Injektor lösen und so ins Bauteil gelangen.



1. Einsaugen der Verunreinigungen

2. Einbringen der Verunreinigungen beim Guss

**Abbildung 83: Schema des Mechanismus "Oxidbildung durch Verunreinigung"**



### 8.1.2 Fehlerart 2 „Gefaltete Oxidhaut“

Wie im Kapitel „Stand der Technik“ auf Seite 16 beschrieben bildet sich diese Art von Fehler während dem Gießvorgang. Nach *Campbell* wird diese Art von Oxid als „neues“ Oxid bezeichnet, da es erst in der letzten Phase des Gießvorganges entsteht. Turbulenzen sowie Strömungsabbrisse in der Kokille können zur Bildung solcher Fehlstellen im Gussteil führen. Betrachtet man den Schmelzeverlauf in der Kokille, so wird klar, dass eine vom Rand der Kokille zurückgeworfene Wellenfront zum Einklappen einer Oxidhaut führen kann, wie in der Theorie, auf Seite 15, schematisch dargestellt.

Dieser Hauptfehlermechanismus kann von Weiteren begleitet werden, die sich in Art und Lage des Fehlers kaum von Fehlerbild 2 unterscheiden. Zum Beispiel kann diese Art von Bauteilschädigung aufgrund von Vorerstarrungen im Bereich der Kokille entstehen. Der Bereich der Kernlager bildet hier einen möglichen Fehlerentstehungsort. Aufgrund von konturbedingten strömungsarmen Stellen in diesen Bereichen, bzw. zwischen den Ein- und Auslasskernen und dem Wassermantel, kann es zur lokalen vorzeitigen Abkühlung und Erstarrung der Schmelze kommen. Während der Füllbewegung und der daraus resultierenden Temperaturveränderung können diese vorerstarrten Bereiche aus der Engstelle herausgezogen werden und sich im Gussteil als Fehlstelle einlagern.

### 8.1.3 Fehlerart 3 „Kollabierte Gasblase“

Eine mögliche Entstehungsursache für Fehlerart 3 ist der Einschluss von Gas im Guss. Hierbei wird davon ausgegangen, dass sich analog zur Theorie eingeschlossenes Gas in Form einer Blase im Gußteil absetzt. Im Laufe der Erstarrung entgast diese Blase und eine Oxidhaut („bubble trail“) die den Weg des Gases und die Blasenhülle abzeichnet, bleibt zurück.

Allgemein kann in zwei unterschiedliche Mechanismen des Gaseintrags unterschieden werden:

- Einschluss von Kerngas
- Gas- bzw. Lufteinschluss aufgrund von Strömungsvorgängen

---

Aufgrund der Beschaffenheit von Gießereikernen und den in Ihnen enthaltenen Bindersystemen kann es beim thermischen Zerfall aufgrund des Gießvorgangs verstärkt zu Gasbildung kommen. Dieses Gas wird einerseits über Kerngasabsaugungen, andererseits durch einen freien Weg zur Umgebung (Entlüftung) abgeführt. Dennoch kann es während des Gießvorganges in geometrischen Engstellen oder durch strömungsbedingte Gegebenheiten zum Einschluss von Kerngas oder Luft im Guss kommen. Diese Art von Fehlerbild hat eine Sonderstellung, da sie nur beim ZK N63 aufgefunden wurde und in äußerst geringer Anzahl vorkam. Aufgrund der Gefügeuntersuchungen der Fehlstelle und der EDX Analyse kann daraus geschlossen werden, dass es sich hierbei um eine in der Schmelze kollabierte Gasblase handelt. Das Gefügebild in Abbildung 69 zeigt eine eutektische Erstarrung innerhalb einer dendritischen Struktur, die auf ein Nachspeisen zurückzuführen ist.

## 9 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurden die verfahrensbedingten Fehler beim Gießvorgang hochbelasteter Zylinderköpfe im ICA-Verfahren analysiert, klassifiziert und charakterisiert. Auf die möglichen Entstehungsursachen wurde eingegangen und mittels Simulation wurden mögliche Fehlerquellen untersucht. Grundlage für diese Arbeit bildet eine umfassende Literaturrecherche zum Thema „Oxidbildung“ und „Bauteilschädigung durch Oxide“. Hierfür wurden einschlägige Fachliteratur, sowie Fachzeitschriften und elektronische Medien herangezogen. Ziel war es einen Überblick über die Oxidbildungsmechanismen zu geben, um in Folge die gefundenen Fehler mit diesen in Verbindung zu bringen. Hierbei könnten drei grundlegende Oxidbildungsmechanismen erarbeitet werden. Diese sind einerseits die Oxidbildung durch Schmutz aus der Gießeinheit bzw. der Schmelze, des Weiteren strömungsbedingte Oxidbildung, und Oxidbildung aufgrund von kollabierten Gasblasen.

Die Analysen zu dieser Arbeit wurden an einer Serie Vierzylinder Zylinderköpfen (BMW interne Bezeichnung N20) und einer Serie V8-Zylinderköpfen (BMW interne Bezeichnung N63) durchgeführt. Begonnen wurden die Analysen mit Dichtheitsprüfung, bei der in Gut- und Schlechteilen unterschieden wird und an den fehlerhaften Teilen die Fehlstellen für die spätere Analyse markiert wird. Als zusätzliches Prüfverfahren für Oxide wurde Quasar auf seine Zuverlässigkeit hin überprüft. Die standardmäßige Verwendung einer Sortiervariante erweist sich nicht als sicheres Instrument, da in Teilbereichen auch andere Sortiervarianten gute bzw. bessere Ergebnisse liefern. Durch die Tests am ZK N63 stellte sich hierbei heraus, dass zielsichere Ergebnisse nur nach genauer Kenntnis der tatsächlichen Zustände (Dichtheitsprüfung) der Teile erzielbar sind, da andernfalls die Sortiervariante nicht zugeordnet werden kann. Alle Sortiervarianten fanden um ca. acht Prozent weniger Fehlerteile als in der Dichtheitsprüfung festgestellt wurde. Im nächsten Schritt wurden die Zylinderköpfe zertrennt und im Bereich der Fehlstelle mit Gewalt gebrochen. Hierbei wurden nicht nur die fehlerhaften Teile aufgebrochen, sondern auch Gutteile. Dadurch wurde einerseits das Ergebnis der Dichtheitsprüfung verifiziert und andererseits Fehler, welche nicht zu einer Undichtheit geführt hatten ebenso analysiert und statistisch erfasst. Die Analysen der Fehlstellen gliederten sich

---

in erster Linie in visueller Analyse, REM/EDX, Mikro-CT und Lichtmikroskopie bzw. Metallographie. Die hierbei gefundenen Ergebnisse führten zur Klassifizierung der Fehler in drei Arten. Die erste Art wird nach Campbell als „altes Oxid“ bezeichnet und stellt einen harten Einschluss dar, der während der Warmhaltephase im Ofen bzw. bei Reaktionen mit den Gefäßwänden der Transporttiegel oder der Gießeinheit entsteht. Seine Ausdehnung beträgt 1 bis 20 mm. Diese Art ist vorwiegend in Engstellen des Gussteiles aufzufinden. Die zweite Fehlerart, nach Campbell als „neues Oxid“ bezeichnet, ist ein Oxidfilm, der während des Gießvorganges entsteht. Gründe dafür können eine turbulente Füllung, sowie Vorerstarrungen auf Kernen und Kokille sein. Die Lage dieses Fehlers war beim ZK N63 meistens am Rande der Bruchflächen in denen er gefunden wurde, beim ZK N20 bildete er in den meisten Fällen einen Durchgang zwischen den beiden Einlasskanälen. Der Fehler wurde in Größenordnungen von 2 bis 10 mm gefunden. Die dritte Fehlerart beschränkte sich auf den ZK N63 auffindbar und äußerte sich als reiner metallischer Einschluss im Gefüge. Das Schlibbild zeigt eine Wärmebehandlung im Gefüge des Fehlers selber, was daraus schließen lässt, dass es sich hierbei um eine kollabierte Gasblase deren Überbleibsel handelt.

In Hinblick auf Oxide muss besonders Augenmerk auf die Schmelzequalität und die richtige Handhabung der Schmelze gelegt werden. Oxide der Fehlerart 1 lassen sich durch eine Optimierung der Schmelzereinigung im Ofen und in der Dosiereinheit vermeiden. Fehler der Art 2 sind aufgrund ihrer Entstehung während des Gießvorganges in erster Linie durch konstruktive Maßnahmen zu vermeiden. Turbulente Strömungsbereiche sowie Orte an denen sich Wellenberge bilden sind möglichst zu vermeiden. Das Einziehen von Luft sowie die Bildung von Kern-Gas sind durch gezielte Maßnahmen zu verhindern.

In der Simulation mittels Flow3D konnten Temperaturunterschiede von Einlass zu Auslassseite vorhergesagt werden, die sich im realen Guss durch eine höhere Schmelzeremperatur auf der Auslassseite bestätigen ließen. Es wurden mögliche Fehlerentstehungsorte durch Strömungssimulation insbesondere im Bereich der Kernlager gefunden, sowie Strömungstotbereiche, die ebenfalls im realen Guss in Hinblick auf die Fehlerentstehung problematisch werden können.

## 10 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Einteilung der Gießverfahren.....	9
Abbildung 2: ICA-Verfahren.....	11
Abbildung 3: Nr. 1-12 Schema ICA .....	12
Abbildung 4: Entstehung einer Oxidhaut durch Faltung [4] .....	15
Abbildung 5: Erscheinungsformen a) gefaltete Oxidhaut b) gefaltete Oxidhaut mit Luftblaseneinschlüssen [4] .....	16
Abbildung 6: Durch Dendriten gerichtete Oxidhaut [6] .....	17
Abbildung 7: a) Oxidhaut in dendritischer Matrix b) Vergrößerung [8].....	17
Abbildung 8: Blasenzerfall und Oxidhaut [4].....	18
Abbildung 9: Effekt der kritischen Fallhöhe [8] .....	19
Abbildung 10: Bauteilschädigung in Abhängigkeit von der Fehlergröße [12] .....	21
Abbildung 11: Anzahl der für Ermüdungsschädigung verantwortlichen Gussfehler in Abhängigkeit vom Gießverfahren [12] .....	22
Abbildung 12: Korund-Abblagerungen an einer Ofenwand [13] .....	23
Abbildung 13: Qualitätsgrenze für Einschlüsse von Oxiden, Boriden und Karbiden in .....	24
Abbildung 14: Versuchsplan.....	25
Abbildung 15: Zylinderkopf N20 .....	26
Abbildung 16: Zylinderkopf N63 .....	26
Abbildung 17: Lagebestimmung Zylindernummern und Kanäle ZK N63 .....	27
Abbildung 18: Schema der Dichtheitsprüfung .....	29
Abbildung 19: Benennung der Bereiche des ZK für Zuordnung der Fehlstellen.....	29
Abbildung 20: Schema der Differenzdruck Dichtheitsprüfung .....	30
Abbildung 21: Dichtprüfergebnisse am Bsp. ZK N63 .....	31
Abbildung 22: Schnittraster am Beispiel ZK N63.....	31
Abbildung 23: Schnitt- und Bruchmarkierung an einer ZK-Scheibe.....	32
Abbildung 24: a) Blasen in Engstelle b) Oxidhauteinschluss.....	33
Abbildung 25: Funktionsschema CT mit Zeilendetektor [15] .....	33
Abbildung 26: Funktionsschema CT mit Flächendetektor [15] .....	34
Abbildung 27: CT-Bild von ZK mit zwei Fehlern .....	35
Abbildung 28: 2D und 3D Ausgabe von Mikro-CT.....	36
Abbildung 29: Abgleich zwischen 3D-Modell und realem Schnitt.....	37

---

Abbildung 30: Vergleich Stereo- und Lichtmikroskop .....	38
Abbildung 31: Rasterelektronenmikroskop Zeiss Typ EVO® [18] .....	39
Abbildung 32: Atommodell zur Erklärung der Entstehung der Röntgenemission (EDX) [19] .....	40
Abbildung 33: Funktionsweise EDX mit angeregtem Volumen [20].....	41
Abbildung 34: REM-Bild mit Oxidhaut und EDX-Spektrum der Fehlstelle .....	41
Abbildung 35: Federmodell ohne Fehler .....	42
Abbildung 36: Federmodell mit Fehlstellen .....	42
Abbildung 37 a-f.: Schwingungs- bzw. Resonanzverhalten eines Körpers [16].....	43
Abbildung 38: Schema Quasar Prüfeinrichtung.....	44
Abbildung 39: Aufgezeichnetes Spektrum eines Zylinderkopfes .....	44
Abbildung 40: Resonanzmusteranalyse, Berechnung Q-Wert .....	45
Abbildung 41: Vereinfachte Visuelle Darstellung der Prüfergebnisse [16].....	45
Abbildung 42: Eigenschaftsraum [17].....	46
Abbildung 43: Prüfmatrix [16] .....	46
Abbildung 44: Bruchfläche Fehlerart 1 ZK N63 .....	49
Abbildung 45: Bruchfläche Fehlerart 2 dunkle Variante ZK N63 .....	50
Abbildung 46: Bruchfläche Fehlerart 2 helle Variante ZK N63 .....	50
Abbildung 47: Bruchfläche Fehlerart 1 ZK N20 .....	51
Abbildung 48: Ungebrochene trichterförmige N20 Fehlstelle .....	51
Abbildung 49: sich wiederholendes N20 Fehlerbild 1 .....	52
Abbildung 50: Bruchfläche Sonderform von Fehlerart 2 ZK N20 .....	52
Abbildung 51: Bruchfläche Fehlerart 3 Bild 1 ZK N63 .....	53
Abbildung 52: Bruchfläche Fehlerart 3 Bild 2 ZK N63 .....	53
Abbildung 53: N63 Fehlerbild 1 (REM-Analyse).....	54
Abbildung 54: EDX-Diagramm von N63 Fehlerbild 1 .....	54
Abbildung 55: N63 Fehlerbild 2 (REM-Analyse).....	55
Abbildung 56: EDX-Diagramm von N63 Fehlerbild 2 .....	55
Abbildung 57: N20 Fehlerbild 1 (REM-Analyse).....	56
Abbildung 58: EDX-Diagramm von N20 Fehlerbild 2 .....	56
Abbildung 59: N20 Fehlerbild 2 (REM-Analyse).....	57
Abbildung 60: N63 Fehlerbild 3 (REM-Analyse).....	58
Abbildung 61: EDX-Diagramm von N63 Fehlerbild 3 .....	58
Abbildung 62: Bild 1-3: Schnitt und 3D-Modell von Fehlstellen N63 Fehlerart 1 .....	59

---

Abbildung 63: Bild 1-3: Schnitt und 3D-Modell von Fehlstelle N63 Fehlerart 2 .....	60
Abbildung 64: Schnitt und 3D-Modell von Fehlstelle N63 Fehlerart 3 .....	61
Abbildung 65: Schliffbild von N63 Fehlerbild 1 .....	62
Abbildung 66: Schliffbild von N63 Fehlerbild 2 .....	63
Abbildung 67: Schliffbild von N20 Fehlerart 1.....	63
Abbildung 68: Schliffbild von N20 Fehlerbild 2 .....	64
Abbildung 69: Schliffbild von N63 Fehlerbild 3 .....	64
Abbildung 70: Ergebnisse Dichtheitsprüfung ZK N63.....	66
Abbildung 71: Ergebnisse Dichtheitsprüfung ZK N20.....	67
Abbildung 72: Auswertung nach Übereinstimmung mit der Dichtheitsprüfung ZK N63 .....	68
Abbildung 73: Häufigkeiten der Fehler nach Art (Fehlerbild) und Größe, ZK N63.....	70
Abbildung 74: Häufigkeiten der Fehler nach Art (Fehlerbild) und Größe, ZK N20.....	71
Abbildung 75: Häufigkeit der Oxide nach Lage ZK N63 .....	71
Abbildung 76: Häufigkeit der Oxide nach Lage ZK N20 .....	72
Abbildung 77: a-d. Strömungssimulation ICA 2-Zylinder .....	75
Abbildung 78: Temperatur während des Gießens [t=3,5s] .....	76
Abbildung 79: Geschwindigkeit während des Gießens [t=3,5s].....	76
Abbildung 80: Surface Defect Concentration [t=3,46s].....	77
Abbildung 81: Strömungssimulation mit potentielltem Fehlerart.....	78
Abbildung 82: Temperatur-Simulation mit möglichem Fehlerort, ZK N20 [t=3,58s]...	79
Abbildung 83: Schema des Mechanismus "Oxidbildung durch Verunreinigung" .....	80

---

## 11 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Physikalische und chemische Daten Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [1,3] .....	13
Tabelle 2: Oxidformen [5] .....	14
Tabelle 3: Prüfverfahren und mögliche Fehler.....	27
Tabelle 4: Übersicht über Fehlerarten .....	65
Tabelle 5: Daten der Dichtheitsprüfungen ZK N63 und ZK N20 .....	67
Tabelle 6: Sortierqualität nach bestem Ergebnis .....	69
Tabelle 7: Sortierqualität der besten drei Ergebnisse im Detail .....	69
Tabelle 8: Vergleich Dichtheitsprüfung - Quasar Prüfung .....	70
Tabelle 9: Fehlerhäufigkeit in Abhängigkeit der Gießparameter.....	73
Tabelle 10: Simulationsthemen und –ziele .....	74



---

## 12 Literaturverzeichnis

- [1] Hasse, S., *Gießerei-Lexikon*. 19 ed. 2008: Schiele & Schoen. 1138 pp.
- [2] Hasse, S., *Gussfehler*. 2002: Schiele & Schoen. 213-219.
- [3] (IFA), I.f.A.d.D.G.U. *GETIS Stoffdatenbank*. 2010; Available from: <http://biade.itrust.de/biade/lpext.dll/Infobase/uberschrift01184?f=templates&fn=main-h.htm&2.0>.
- [4] Campbell, J., *Castings*. 2 ed. 2003: Butterworth-Heinemann. 17-25.
- [5] Campbell, J., *Castings*. 2 ed. 2003: Butterworth-Heinemann. 74.
- [6] Campbell, J., *Castings*. 2 ed. 2003: Butterworth-Heinemann. 54-57.
- [7] Griffiths, R.R.a.W.D., *A Method to Study the History of a Double Oxide Film Defect in Liquid Aluminum Alloys*. METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS B, 2006. 37B: p. 865-871.
- [8] Campbell, J., *Castings*. 2 ed. 2003: Butterworth-Heinemann. 38-39.
- [9] Sigloch, H., *Technische Fluidmechanik*. 7 ed. 2009: Springer. 209.
- [10] Pfeiffer, H., *Taschenbuch industrielle Wärmetechnik*. 4 ed. 2007: Vulkan. 132.
- [11] Siekmann, H.E., *Strömungslehre für den Maschinenbau: Technik und Beispiele*. 2008: Springer. 240.
- [12] Q.G. WANG, C.J.D., J.R. GRIFFITHS, and P.N. CREPEAU, *Oxide Films, Pores and the Fatigue Lives of Cast Aluminum Alloys*. METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS B, 2006. 37B.
- [13] Ralf Klos, P.K., *Fotos: Aluminium Rheinfelden, Fehlerfrei beginnen*. GIESSEREI-ERFAHRUNGSAUSTAUSCH, 2008(6): p. 26-29.
- [14] Ostermann, F., *Anwendungstechnologie Aluminium*. 2 ed. 2007. 189.
- [15] YXLON. *Computertomographie*. 2010; Available from: [http://www.yxlon.de/yxlon\\_de/index.nsf/REFFileUpload/idB9C9CA71C4F93561C125723E004E136C\\_2/\\$FILE/Computer%20Tomographie.pdf](http://www.yxlon.de/yxlon_de/index.nsf/REFFileUpload/idB9C9CA71C4F93561C125723E004E136C_2/$FILE/Computer%20Tomographie.pdf).
- [16] Nath, R., *Quasar Operating Principles - Forschungsbericht*. 2005. Quasar International Inc.
- [17] Everly, M.J., L. ; Nath, B. ; Saxton, J., *Casting Specification for Process Compensated Resonant Testing*. Magnaflux Quasar, 2007.
- [18] [www.zeiss.de](http://www.zeiss.de), Stand Jänner 2010

- 
- [19] Cepheiden. *Atom model (schematic) for the explanation of the emergence of the Roentgen emission (EDX)*. 2008; Available from: [http://www.elektro.de/lexikon.html?title=Datei:Atom\\_model\\_for\\_EDX\\_DE.svg&filetimestamp=20081114154844](http://www.elektro.de/lexikon.html?title=Datei:Atom_model_for_EDX_DE.svg&filetimestamp=20081114154844).
- [20] Friedlmeier, T., *Energiedispersive Röntgenmikroanalyse*. 2009.
- [21] JONES, Q.G.W.a.P.E., *Prediction of Fatigue Performance in Aluminum Shape Castings Containing Defects*. METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS B, 2007. 38B: p. 615-621.
- [22] H. Kaufmann, A.M., D. Limburg, *Untersuchungen zum Verschmelzen von Füllfronten im Semi-Solid Guss*. Druckguss Praxis, 2004. 4/2004: p. 173-177.
- [23] J. Mia, R.A.H., M. Wickinsb, J. Campbellb, *Entrained oxide films in TiAl castings*. Intermetallics, 2003. 11: p. 377-385.
- [24] J. Espinoza-Cuadra, G.G.a.-G.a., H. Mancha-Molinar, *Influence of defects on strength of industrial aluminum alloy Al–Si 319*. Materials and Design, 2005. 28: p. 1038–1044.

## 13 Anhang

### 13.1 Aufbruchliste ZK N63

Teilenummer	Gießdatum	Schnitt-Nr.	Schnitt-Tiefe [mm]	Fehlerbeschreibung	Größe 1<2<3	Art	Einlass-Seite	Auslass-Seite	
26570340	170209	1	465	i.O.					
		2	440	i.O.					
		3	415	i.O.					
		4	370	i.O.					
		5	345	i.O.					
		6	320	i.O.					
		7	275	i.O.					
		8	250	i.O.					
		9	225	i.O.					
		10	175	i.O.					
		11	150	i.O.					
		12	125	i.O.					
26570680	170209	1	465	i.O.			E		
		2	440	i.O.			E		
		3	415	i.O.					
		4	370	i.O.					
		5	345	i.O.					
		6	320	i.O.					
		7	275	i.O.					
		8	250	Oxid am Auslasskanal		1			
		9	225	i.O.					
		10	175	i.O.					
		11	150	i.O.					
		12	125	i.O.					
26594580	200309	1	465	i.O.			E	A	
		2	440	Oxid am Auslasskanal	3	2	E	A	
		3	415	i.O.					
		4	370	i.O.			E	A	
		5	345	Oxid am Auslasskanal	1	2	E	A	
		6	320	vermutlich Oxid am Ein- und Auslasskanal	1	1			
		7	275	Glänzende Bruchfläche					
		8	250	Oxid einlassseitig ab Beginn Mittelwand	1	1			
		9	225	punktförmiges Oxid auf Einlassseite	1	1			
		10	175	Oxid am Auslasskanal	1	2	E	A	
		11	150	Oxid am Einlasskanal	1	1	E	A	
		12	125	Oxid am Einlasskanal	1	1			

26594600	200309	1	465	i.O.			E	A
		2	440	Oxid am Einlasskanal	1	1	E	A
		3	415	i.O.				
		4	370	i.O.				
		5	345	Oxid am Auslasskanal	2	1		
		6	320	i.O.				
		7	275	Oxid am Auslasskanal	2	1		
		8	250	Oxid am Auslasskanal, Abblatterung am Einlass	2	1		
		9	225	Oxid am Auslasskanal	2	1		
		10	175	i.O.				A
		11	150	Oxid am Auslasskanal	3	2		A
		12	125	i.O.				
26594700	200309	1	465	i.O.				
		2	440	Oxid einlassseitig ab Beginn Mittelwand	3	1	E	A
		3	415	i.O.			E	A
		4	370	i.O.				
		5	345	mgl. gefaltete Oxidhaut auslassseitig	X	2		
		6	320	Oxid am Auslasskanal	1	1		
		7	275	Oxid (?) am Einlasskanal	X	2		
		8	250	i.O.				
		9	225	Oxid am Auslasskanal	2	1		
		10	175	i.O.				A
		11	150	Oxid am Auslasskanal	3	1		A
		12	125	?				
26594540	200309	1	465	i.O.				
		2	440	Oxid am Einlasskanal, Blase	3			
		3	415	i.O.				
		4	370	i.O.				
		5	345	Oxid am Auslasskanal	1	1		
		6	320	i.O.				A
		7	275	i.O.				A
		8	250	Oxid am Auslasskanal	1	1		
		9	225	i.O.				
		10	175	i.O.				
		11	150	Oxid am Auslasskanal, Blase	2	1		
		12	125	i.O.				
26594860	230309	1	465	i.O.				
		2	440	i.O.				
		3	415	i.O.				
		4	370	i.O.				A
		5	345	i.O.				A
		6	320	i.O.				
		7	275	i.O.				A
		8	250	Oxid am Auslasskanal	2	1		A
		9	225	i.O.				
		10	175	i.O.				
		11	150	i.O.				
		12	125	i.O.				

26594960	230309	1	465	i.O.					
		2	440	i.O.					
		3	415	i.O.					
		4	370	i.O.					A
		5	345	Oxid am Auslasskanal					A
		6	320	i.O.					
		7	275	i.O.					
		8	250	i.O.					
		9	225	i.O.					
		10	175	i.O.					
		11	150	i.O.					
		12	125	i.O.					
26595180	230309	1	465	i.O.					
		2	440	Glänzende Bruchfläche (?)	X				
		3	415	i.O.					
		4	370	Glänzende Bruchfläche (HVA ?)	X				
		5	345	i.O.					A
		6	320	Grobleck + Oxid Auslasseite	3	2			A
		7	275	i.O.					
		8	250	i.O.					
		9	225	Glänzende Bruchfläche Auslasss. (keine Probe)					
		10	175	i.O.					
		11	150	i.O.					
		12	125	i.O.					
26570460	170209	1	465	i.O.				E	A
		2	440	i.O.				E	A
		3	415	i.O.					
		4	370	i.O.				E	
		5	345	i.O.				E	
		6	320	i.O.					
		7	275	i.O.					
		8	250	i.O.					
		9	225	i.O.					
		10	175	i.O.					
		11	150	i.O.					
		12	125	i.O.					
26594520	200309	1	465	i.O.					
		2	440	i.O.					
		3	415	i.O.					
		4	370	i.O.					
		5	345	i.O.					
		6	320	i.O.					
		7	275	i.O.					
		8	250	i.O.					
		9	225	i.O.					
		10	175	i.O.					
		11	150	i.O.					
		12	125	i.O.					

26594900	230309	1	465	i.O.				
		2	440	i.O.				
		3	415	i.O.				
		4	370	i.O.				
		5	345	i.O.				
		6	320	i.O.				
		7	275	i.O.				
		8	250	i.O.				
		9	225	i.O.				
		10	175	i.O.				
		11	150	i.O.				
		12	125	i.O.				
26594420	200309	1	465	i.O.				
		2	440	punktförmiges Oxid auf Auslassseite	1	1		
		3	415	i.O.				
		4	370	i.O.				
		5	345	Oxid am Einlass- und Auslasskanal	1	1		
		6	320	i.O.				
		7	275	i.O.				
		8	250	i.O.				
		9	225	i.O.				
		10	175	i.O.				E
		11	150	Oxid am Einlass- und Auslasskanal	1	1		E
		12	125	i.O.				
26594480	200309	1	465	Oxid am Auslasskanal	1	1		
		2	440	i.O.				
		3	415	i.O.				
		4	370	i.O.				
		5	345	Oxid am Auslasskanal	1	1		
		6	320	i.O.				
		7	275	i.O.				E
		8	250	Oxid am Einlasskanal	1	1		E
		9	225	i.O.				
		10	175	i.O.				E
		11	150	Oxid am Einlasskanal	1	1		E
		12	125	i.O.				
26594500	200309	1	465	i.O.				
		2	440	i.O.				E
		3	415	i.O.				E
		4	370	i.O.				
		5	345	i.O.				
		6	320	i.O.				
		7	275	i.O.				
		8	250	i.O.				
		9	225	i.O.				
		10	175	i.O.				
		11	150	i.O.				
		12	125	i.O.				

26594560	200309	1	465	Oxid am Auslasskanal	1	1		
		2	440	Oxid am Einlass- und Auslasskanal	1	1	E	
		3	415	Oxid am Einlass- und Auslasskanal	1	1	E	
		4	370	Oxid am Einlass- und Auslasskanal	3	1		A
		5	345	Oxid am Einlass- und Auslasskanal	3	3		A
		6	320	Oxid am Einlass- und Auslasskanal	1	1		
		7	275	Oxid am Einlasskanal	2	2	E	
		8	250	Oxid am Einlass- und Auslasskanal	3	3	E	
		9	225	Oxid am Auslasskanal	1	1		
		10	175	Oxid am Auslasskanal	1	1		
		11	150	Oxid am Einlass- und Auslasskanal	2	1		
		12	125	Oxid am Auslasskanal	1	1		
26594720	200309	1	465	Oxid am Einlass- und Auslasskanal	1	1		
		2	440	Oxid am Einlass- und Auslasskanal	2	1	E	A
		3	415	Oxid am Einlasskanal	1	1	E	A
		4	370	i.O.				
		5	345	i.O.				
		6	320	i.O.				
		7	275	Oxid am Einlass- und Auslasskanal	1	1		
		8	250	Oxid am Einlass- und Auslasskanal	1	1		
		9	225	Oxid am Einlasskanal	2	1		
		10	175	i.O.			E	
		11	150	Oxid am Einlass- und Auslasskanal ?	1	1	E	
		12	125	Oxid am Auslasskanal	1	2		
26570380	170209	1	465	i.O.				
		2	440	i.O.				
		3	415	i.O.				
		4	370	i.O.				
		5	345	i.O.				
		6	320	i.O.				
		7	275	i.O.				
		8	250	i.O.				
		9	225	i.O.				
		10	175	i.O.				
		11	150	i.O.				
		12	125	i.O.				
26570480	170209	1	465	i.O.				
		2	440	i.O.				
		3	415	i.O.				
		4	370	i.O.			E	
		5	345	i.O.			E	
		6	320	i.O.				
		7	275	i.O.				
		8	250	i.O.				
		9	225	i.O.				
		10	175	i.O.				
		11	150	i.O.				
		12	125	i.O.				

26570580	170209	1	465	i.O.				
		2	440	i.O.				
		3	415	i.O.				
		4	370	i.O.				
		5	345	i.O.				
		6	320	i.O.				
		7	275	i.O.				
		8	250	i.O.				
		9	225	i.O.				
		10	175	i.O.				
		11	150	i.O.				
		12	125	i.O.				
26570640	170209	1	465	i.O.				
		2	440	i.O.				
		3	415	i.O.				
		4	370	i.O.				
		5	345	i.O.				
		6	320	i.O.				
		7	275	i.O.				
		8	250	i.O.				
		9	225	i.O.				
		10	175	i.O.				
		11	150	i.O.				
		12	125	i.O.				
26570660	170209	1	465	i.O.				
		2	440	i.O.				
		3	415	i.O.				
		4	370	i.O.				
		5	345	i.O.				
		6	320	i.O.				
		7	275	i.O.				
		8	250	Oxid am Auslasskanal	2	1		
		9	225	i.O.				
		10	175	Oxid am Auslasskanal	2	1		
		11	150	i.O.				
		12	125	i.O.				



**13.2 Aufbruchliste ZK N20**

Teilenummer	Gießdatum	Schnitt-Nr.	Fehlerbeschreibung	Größe 1<2<3	Art	Einlass- Seite	Auslass- Seite
5	27.07.2009	1	i.O.			E1-K1	
		2	i.O.				
		3	i.O.				
		4	i.O.				
		5	i.O.				
		6	i.O.				
		7	i.O.				
		8	i.O.				
		9	i.O.				
		10	i.O.				
		11	Einlasseitiges Oxid	1	2		
		12	i.O.				
7	27.07.2009	1	i.O.				
		2	i.O.				
		3	i.O.				
		4	i.O.				
		5	Einlasseitiges Oxid	2	2		
		6	i.O.				
		7	i.O.				
		8	Einlasseitiges Oxid	2	2		
		9	Einlasseitiges Oxid	1	2		
		10	Einlasseitiges Oxid	1	2		
		11	Einlasseitiges Oxid	2	2		
		12	i.O.				
67	27.07.2009	1	i.O.				
		2	Ein- und Auslasseitiges Oxid	1	2		
		3	i.O.				
		4	i.O.				
		5	Einlasseitiges Oxid	2	2		
		6	i.O.				
		7	i.O.				
		8	Einlasseitiges Oxid	1	2		
		9	i.O.				
		10	i.O.				
		11	i.O.				
		12	i.O.				

70	27.07.2009	1	Einlasseitiges Oxid		2	E1-K1-Innen E4-K2-Innen
		2	Ein- und Auslasseitiges Oxid		2	
		3	i.O.			
		4	i.O.			
		5	Ein- und Auslasseitiges Oxid		2	
		6	i.O.			
		7	Einlasseitiges Oxid		2	
		8	i.O.			
		9	i.O.			
		10	i.O.			
		11	Ein- und Auslasseitiges Oxid		2	
		12	i.O.			
82	27.07.2009	1	i.O.			
		2	Einlasseitiges Oxid		2	
		3	i.O.			
		4	i.O.			
		5	Auslasseitiges Oxid			
		6	i.O.			
		7	i.O.			
		8	Einlasseitiges Oxid		2	
		9	i.O.			
		10	i.O.			
		11	i.O.			
		12	i.O.			
18	28.07.2009	1	i.O.			
		2	Auslasseitiges Oxid + kalotte		2	
		3	i.O.			
		4	i.O.			
		5	Ein- und Auslasseitiges Oxid		2	
		6	i.O.			
		7	i.O.			
		8	Ein- und Auslasseitiges Oxid		2	
		9	i.O.			
		10	i.O.			
		11	i.O.			
		12	i.O.			

28	28.07.2009	1	i.O.				
		2	Ein- und Auslasseitiges Oxid		2		
		3	i.O.				
		4	i.O.				
		5	Einlasseitiges Oxid		2		
		6	Einlasseitiges Oxid		2		
		7	i.O.				
		8	Ein- und Auslasseitiges Oxid		2		
		9	i.O.				
		10	Einlasseitiges Oxid		2		
		11	Einlasseitiges Oxid		2		
		12	i.O.				
40	28.07.2009	1	i.O.			E1-K1-Innen	
		2	Ein- und Auslasseitiges Oxid		1		
		3	i.O.				
		4	Einlasseitiges Oxid		2		
		5	i.O.				
		6	i.O.				
		7	i.O.				
		8	Einlasseitiges Oxid		2		
		9	i.O.				
		10	i.O.				
		11	i.O.				
		12	i.O.				
53	28.07.2009	1	i.O.				
		2	i.O.				
		3	i.O.				
		4	i.O.				
		5	Ein- und Auslasseitiges Oxid		2		
		6	i.O.				
		7	i.O.				
		8	Ein- und Auslasseitiges Oxid		1		
		9	i.O.				
		10	i.O.				
		11	i.O.				
		12	i.O.				

54	28.07.2009	1	Einlasseitiges Oxid		2		
		2	i.O.				
		3	i.O.				
		4	i.O.				
		5	Einlasseitiges Oxid		2		
		6	i.O.				
		7	i.O.				
		8	Auslasseitiges Oxid		2		
		9	i.O.				
		10	i.O.				
		11	Einlasseitiges Oxid		2		
		12	i.O.				
1	10.09.2009	1	i.O.				
		2	Einlasseitiges Oxid		2		
		3	i.O.				
		4	i.O.				
		5	i.O.				
		6	i.O.				
		7	i.O.				
		8	Ein- und Auslasseitiges Oxid		2		
		9	i.O.				
		10	i.O.				
		11	Ein- und Auslasseitiges Oxid		2		
		12	i.O.				
19	10.09.2009	1	i.O.				
		2	i.O.				
		3	i.O.				
		4	i.O.				
		5	i.O.				
		6	i.O.				
		7	i.O.				
		8	i.O.				
		9	i.O.				
		10	i.O.				
		11	Einlasseitiges Oxid		2		
		12	i.O.				

28	10.09.2009	1	i.O.				
		2	i.O.				
		3	i.O.				
		4	i.O.				
		5	Einlasseitiges Oxid		2		
		6	i.O.				
		7	i.O.				
		8	Einlasseitiges Oxid		2		
		9	i.O.				
		10	i.O.				
		11	Einlasseitiges Oxid		2		
		12	i.O.				
29	10.09.2009	1	i.O.				
		2	i.O.				
		3	i.O.				
		4	i.O.				
		5	Einlasseitiges Oxid		2		
		6	i.O.				
		7	i.O.				
		8	Einlasseitiges Oxid		2		
		9	i.O.				
		10	i.O.				
		11	Einlasseitiges Oxid		2		
		12	i.O.				
4	11.09.2009	1	i.O.				
		2	i.O.				
		3	i.O.				
		4	i.O.				
		5	Einlasseitiges Oxid		2		
		6	i.O.				
		7	i.O.				
		8	Einlasseitiges Oxid		2		
		9	i.O.				
		10	i.O.				
		11	i.O.				
		12	i.O.				

6	11.09.2009	1	i.O.				
		2	Ein- und Auslasseitiges Oxid		2		
		3	i.O.				
		4	i.O.				
		5	Einlasseitiges Oxid		2		
		6	i.O.				
		7	i.O.				
		8	Ein- und Auslasseitiges Oxid		1		
		9	i.O.				
		10	i.O.				
		11	Ein- und Auslasseitiges Oxid		2		
		12	i.O.				
21	10.09.2009	1	i.O.				
		2	i.O.				
		3	i.O.				
		4	i.O.				
		5	i.O.				
		6	i.O.				
		7	i.O.				
		8	Einlasseitiges Oxid		2		
		9	i.O.				
		10	i.O.				
		11	i.O.				
		12	i.O.				
23	10.09.2009	1	i.O.				
		2	i.O.				
		3	i.O.				
		4	i.O.				
		5	Einlasseitiges Oxid		2		
		6	i.O.				
		7	i.O.				
		8	i.O.				
		9	i.O.				
		10	i.O.				
		11	i.O.				
		12	i.O.				