



Volumendefizite von Gussstücken aus Kupfer und Kupfergusswerkstoffen

INHALT

1	Geltungsbereich	2	4.4	Sichtprüfung	9
1.1	Allgemeines	2	4.5	Dichteprüfung	9
1.2	Legierungen	2	4.6	Schliff- und Schnittprüfung	9
1.3	Gießverfahren	2	4.7	Eindringprüfung	10
2	Erläuterungen	2	5	Literaturhinweise, Normen, Richtlinien	11
2.1	Volumendefizite	2	Anhang 1 Werkstoffspezifische Ausbildung von Poren	12	
2.1.1	Schwindungsporosität (Lunker)	2	A 1.1	Kupfer und Kupfer-Chrom Legierungen	12
2.1.2	Warmrisse	3	A 1.2	Kupfer-Zink Legierungen (Messing)	13
2.1.3	Gasporosität	4	A 1.3	Kupfer-Zinn Legierungen (Zinn-Bronze)	14
2.2	Sonstige Fehlstellen	5	A 1.4	Kupfer-Zinn-Zink Legierungen (Rotguss)	15
3	Mögliche Auswirkungen von Porosität	5	A 1.5	Kupfer-Aluminium Legierungen (Aluminium-Bronze)	16
3.1	Statische Festigkeit	6	Anhang 2 Porositätsbestimmung mittels Schliff- und Schnittprüfung und quantitativer Bildanalyse	17	
3.2	Dynamische Festigkeit	6	Anhang 3 Definition weiterer Fehlstellen	23	
3.3	Allgemeine Dichtheit und Dichtflächen	6			
3.4	Oberfläche	6			
3.5	Wärmebehandlung	7			
4	Beurteilung der Porosität von Gussstücken	7			
4.1	Durchstrahlungsprüfung mit Bildverstärker	8			
4.2	Ultraschallprüfung	9			
4.3	Dichtheitsprüfung	9			

Vom Fachausschuss „Kupfergusswerkstoffe“ im BDG erstellte Richtlinie.



1 Geltungsbereich

1.1 ALLGEMEINES

Diese BDG-Richtlinie gilt für Gussstücke aus Kupfer und Kupfergusswerkstoffen. Ziel dieser Richtlinie ist die Beschreibung von Anforderungen an die Gussqualität sowie deren einheitliche Eintragung in technische Unterlagen.

Der Geltungsbereich dieser Richtlinie ist auf innere und äußere Volumendefizite – Porosität – beschränkt. Sonstige Fehlstellen wie z. B. Einfallstellen, Kaltfließstellen, Seigerungen, Grate, Ziehriefen und Brandrissmuster sind nicht Bestandteil dieser Richtlinie.

Porosität kann durch eine Zusammenarbeit von Konstrukteur und Gießer minimiert, aber nicht ausgeschlossen werden.

1.2 LEGIERUNGEN

Der Geltungsbereich dieser Richtlinie beschränkt sich auf Gussstücke aus Kupfergusswerkstoffen nach DIN EN 1982.

1.3 GIESSVERFAHREN

Der Inhalt dieser BDG-Richtlinie bezieht sich auf das Sand- und Kokillengießverfahren und Varianten dieser Verfahren mit ähnlichem Erstarrungsverhalten der Schmelze in der Form.

2 Erläuterungen

2.1 VOLUMENDEFIZITE

2.1.1 Schwindungsporosität (Lunker)

Schwindungsporen, auch Lunker genannt, haben ihren Ursprung in den thermophysikalischen Eigenschaften der Gusswerkstoffe bei der Erstarrung. Die Herstellung vollständig lunkerfreier Gussstücke ist nicht möglich. Lunker können Gase, z. B. H_2 , H_2O , CO , CO_2 oder auch Ausseigerungen, z. B. Blei enthalten.

Die unter den Geltungsbereich der Richtlinie fallenden Kupfer-Gusswerkstoffe haben beim Übergang vom flüssigen und zum festen Aggregatzustand ein sprunghaft abnehmendes spezifisches Volumen (= Erstarrungskontraktion), siehe **Bild 1**.

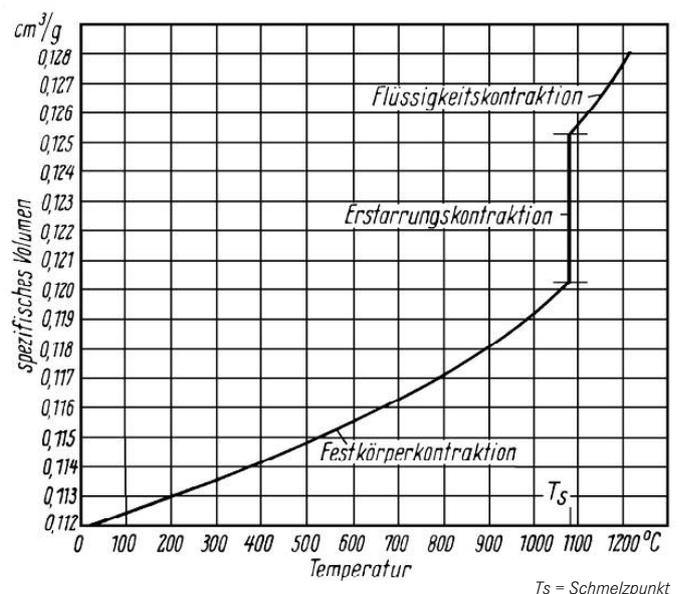


Bild 1: Temperaturabhängigkeit des spezifischen Volumens von Kupfer

Da in der Regel die Randschale und der Anguss eines Gussstücks früh erstarren, können sich im Inneren des Gussstücks Volumendefizite bilden. Durch geeignete erstarrungsgerechte Konstruktion des Gussstücks – Vermeiden von sprunghaften Wanddickenunterschieden – und optimale Auslegung des Gießsystems lassen sich diese Volumendefizite minimieren.

Lunker weisen eine mehr oder minder stark zerklüftete, kavernenartige Form auf.

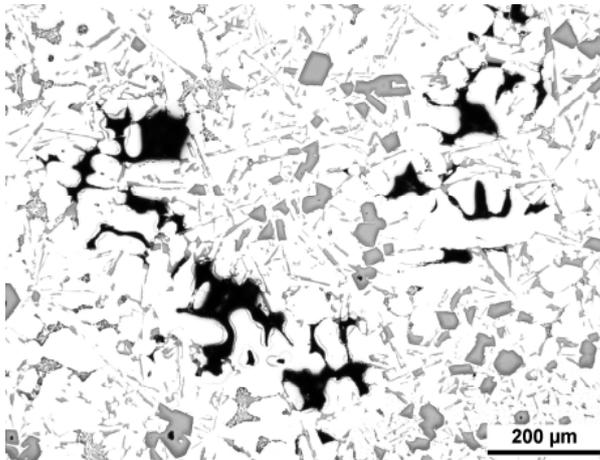


Bild 2: Typische Ausbildungsform der Schwindungsporosität

2.1.2 Warmrisse

Ist die Tragfähigkeit der Randschale geringer als die bei der Schwindung auftretenden Spannungen, kann es zu Warmrissen kommen. Die Warmrisse können, wie auch die Lunker, bei geeigneter Gussstückgestaltung und Formauslegung durch eine entsprechende Nachspeisung betroffener Bereiche ausgeheilt werden. Besonders warmrissanfällig sind Legierungen mit einem breiten Erstarrungsintervall. **Bild 3** zeigt die möglichen Erstarrungstypen der Kupfergusswerkstoffe.

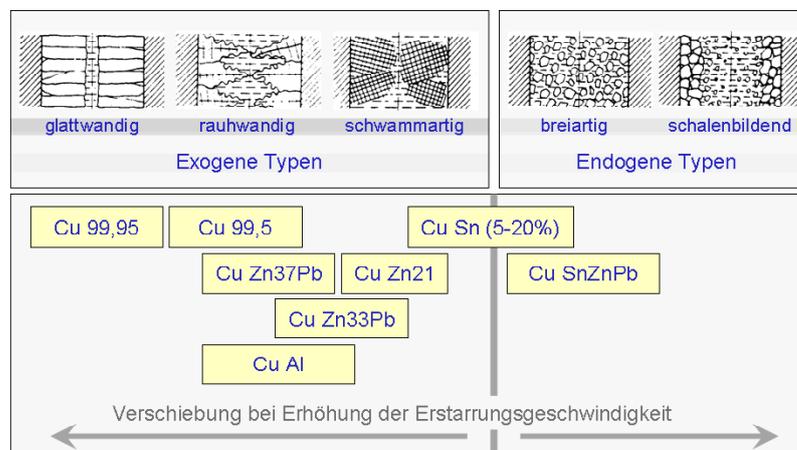


Bild 3: Erstarrungstypen der Kupfergusswerkstoffe



2.1.3 Gasporosität

Gasporen können folgende Entstehungsgründe haben:

- > thermodynamische Ursachen (beim Abkühlen/ Erstarren Überschreiten der Löslichkeitsgrenze von Gasen in der Gusslegierung),
- > strömungsmechanische Ursachen (Einschließen von Luftblasen durch turbulente Formfüllung),
- > Verfahrens- und formstoffbedingte Ursachen (Gasabgabe durch Trennmittel, Kerne/ Formstoff, unzureichende Abführung von Gießgasen).

Ihr Aussehen unterscheidet sich von der schwindungsbedingten Porosität. Reine Gasporen sind, wenn sie bei ihrer Entstehung von Schmelze umschlossen sind, annähernd kreisrund ausgebildet und weisen einen glatten Porenrand auf.

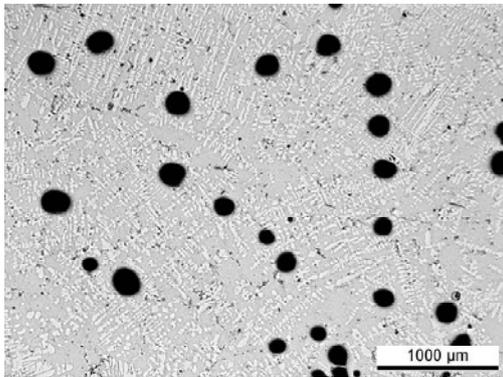


Bild 4: Typische Ausbildungsform von Gasporen

2.1.3.1 Thermodynamisch bedingte Gasporosität

Kupfer und Kupferlegierungen weisen mit fallender Temperatur eine abnehmende Löslichkeit für elementare Gase auf. Beim Abkühlen der Schmelze und der Erstarrung (beim Übergang flüssig-fest) kann daher die Löslichkeitsgrenze überschritten werden und es kann zur Ausscheidung von Gasen und damit zur Bildung von Gasporen kommen. Diese reichern sich häufig im Bereich der Resterstarrung an.

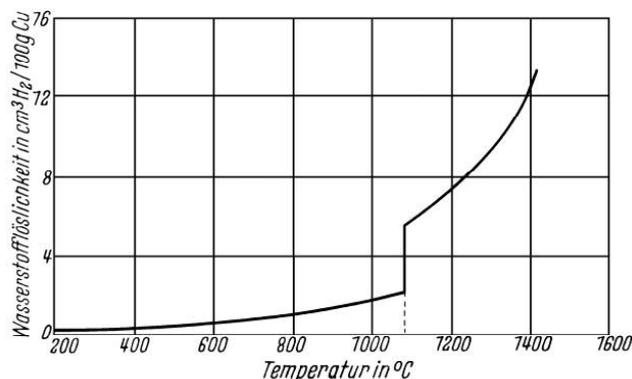


Bild 5: Wasserstofflöslichkeit von Kupfer

Bei Legierungen mit einem ausgeprägten Erstarrungsintervall findet die Gasausscheidung bevorzugt zwi-



schen den Dendritenarmen statt. Hierdurch bedingt weisen Gasporen, die durch die Ausscheidung hervorgerufen werden, in der Regel keine runden Konturen auf, sondern müssen sich in ihrer Form mit dem Dendritennetzwerk arrangieren. Die Abrundung der Kontur hängt vom Gasgehalt der Schmelze ab.

2.1.3.2 Strömungsmechanisch bedingte Gasporosität

Bei der Formfüllung kommt es bei einer turbulenten Metallströmung zum Einschluss von Gasen aus der Umgebungsluft. Strömungsmechanisch bedingte Gasporen weisen aufgrund der Grenzspannungsverhältnisse zwischen Gas und Schmelze in der Regel runde Formen auf.

2.1.3.3 Formstoffbedingte Gasporosität

Durch eine thermisch aktivierte Kontaktreaktion zwischen der Metallschmelze und dem Formstoff oder dem Formwerkstoff bzw. den Formhilfsstoffen wie Trennstoffe oder Schlichte können Gase freigesetzt werden, die in die Schmelze diffundieren und bei der Erstarrung eingeschlossen werden. Diese Gasporen weisen ebenfalls aufgrund der Grenzspannungsverhältnisse zwischen Gas und Schmelze in der Regel runde Formen auf, und sie liegen häufig dicht unter der Gussoberfläche.

Anmerkung: *Im Allgemeinen treten sowohl die schwindungsbedingte Porosität wie auch die Gasporosität gemeinsam auf. Die Gasporen werden in der Regel schwindungsbedingt vergrößert und verlieren dadurch häufig ihre kreisrunde Form.*

2.2 SONSTIGE FEHLSTELLEN

Neben der Porosität gibt es noch weitere Fehlstellen, welche die Qualität eines Gussstückes beeinflussen können, wie Kaltfließstellen, auch Oxidhäute, Ziehriefen, Grate und Brandrissmuster, Sand- und Schlackeeinschlüsse, usw.

Diese Fehlermerkmale werden im Anhang 3 definiert. Sie sind jedoch nicht Bestandteil dieser Richtlinie. Soweit möglich, wird auf weitere Richtlinien und Normen, die diese Fehlstellen und deren Prüfmethode behandeln, hingewiesen.

3 Mögliche Auswirkungen von Porosität

Poren in Gussstücken können je nach Art und Beschaffenheit des Bauteils sowie nach Art der Beanspruchung Auswirkungen auf die Festigkeit, die Druckdichtheit und die Oberflächenbeschaffenheit bzw. das Aussehen des Bauteils haben.

Bei technischen Bauteilen ist insbesondere die Auswirkung der Porosität auf die Bauteilfestigkeit zu beachten. Gleiche Porosität kann bei statischer und dynamischer Beanspruchung des Bauteils unterschiedliche Auswirkungen haben.

Sowohl bei statischer als auch bei zyklischer Beanspruchung sollten Angriffspunkte, Höhe der Beanspruchung und Bereiche mit höchster Spannungskonzentration bekannt sein, um beanspruchungsgerechte Porenklassen auswählen zu können.



3.1 STATISCHE FESTIGKEIT

Bei der Beanspruchung eines Bauteils durch eine äußere Kraft entsteht im belasteten Bauteilquerschnitt eine Spannung. Diese ist proportional zum Quotienten aus Kraft und Querschnittsfläche. Wird der Querschnitt durch Poren verringert (geschwächt), nimmt die Spannung zu. Sobald die resultierende Spannung die Elastizitätsgrenze des Werkstoffs überschreitet, kommt es zu bleibenden Verformungen, die die Festigkeit des Werkstoffes erhöhen, jedoch auch zum Bruch führen können. Zusätzlich zur Spannungserhöhung durch die Querschnittsverringerung kommt es, abhängig von der Porengeometrie, zu einer Kerbwirkung. Bei statischen Belastungen ist in erster Linie die Querschnittschwächung und somit der flächenbezogene Porenanteil als kritisch zu bewerten.

Bei der Biege- und Torsionsbeanspruchung ist die Lage der Porosität, bezogen auf die neutrale Faser, zu beachten. Insbesondere bei schwindungsbedingten Poren liegt die Porosität im Bereich der Materialanhäufung und somit in der Nähe der neutralen Faser. Dadurch kann die Festigkeitsabnahme im Gesamtquerschnitt in guter Näherung auch proportional zum Flächenanteil der Porosität angesehen werden.

3.2 FESTIGKEIT UNTER ZYKLISCHER BEANSPRUCHUNG (DYNAMISCHE FESTIGKEIT)

Die Festigkeit eines Bauteils unter zyklischer Beanspruchung wird außer durch den Werkstoff in starkem Maße durch Kerbfaktoren bestimmt. Sowohl geometrische Konturen als auch Inhomogenität durch Oxidhäute, Einschlüsse, Gefügebestandteile, intermetallische Verbindungen etc. und Gussfehler können Kerben darstellen, deren Kerbfaktoren größer sein können als die von Poren.

Poren haben in Abhängigkeit von ihrer Form, der Lage zur Gussoberfläche und der Anordnung zueinander unterschiedliche Kerbwirkungen. Die Kerbwirkung nimmt

- > mit dem Flächenanteil der Porosität zu und
- > mit zunehmender Rundheit, größerem Radius und wachsendem Abstand der Poren von der Gussoberfläche ab.

3.3 ALLGEMEINE DICHTHEIT UND DICHTFLÄCHEN

Haben Gasporen, Lunker und Warmrisse eine Verbindung zur Gusshaut (offene Poren, Einfallstellen) oder werden sie bei der mechanischen Bearbeitung der Teile angeschnitten, kann es in Abhängigkeit von der Porenverteilung zu Undichtheit der Bauteile und Dichtflächen kommen. In Verbindung mit einer Forderung nach Druckdichtheit sind besonders Warmrisse und netzartig miteinander verbundene Lunker als kritisch zu bewerten.

Poren können in Abhängigkeit von ihrer Form und Größe zu Beschädigungen und/ oder zu Beeinträchtigungen von eingesetzten Dichtungen führen.

3.4 OBERFLÄCHE

Porosität an der Oberfläche kann bei zyklisch belasteten Bauteilen zu Spannungsspitzen führen und eine Risseinleitung bewirken. Die Oberflächenbeschichtungsmöglichkeiten werden beeinträchtigt, da Rückstände/Verunreinigungen in den offenen Hohlräumen verbleiben und bei nachfolgenden Beschichtungsvorgängen Fehler verursachen können.



3.5 WÄRMEBEHANDLUNG

Kupfer und seine Legierungen können wie viele andere metallische Werkstoffe gegläht werden (unter Vorgabe von Temperaturen und Zeiten), um die mechanischen Eigenschaften gezielt einzustellen oder zu optimieren. Als Verfahren kommen das Weichglühen, Homogenisieren, Spannungsarmglühen und Aushärten zum Einsatz. Auf die Porosität hat eine Wärmebehandlung jedoch im Allgemeinen keinen Einfluss. Eine Ausnahme gilt für druckgegossene Bauteile, bei denen Gase unter Druck während der Erstarrung eingeschlossen wurden. Gase können vor allem in Oberflächennähe während einer Wärmebehandlung eine Blisterbildung verursachen. Mit Hilfe einer Zwangsentlüftung oder Vakuumanwendung der Druckgießform lässt sich beim Druckgießen die Blasenbildung minimieren.

4 Beurteilung der Porosität von Gussstücken

Das Maß an Porosität hängt vom Werkstoff, vom Fertigungsverfahren, von der verfahrensgerechten Gestaltung des Bauteiles selbst, von seiner Funktion und vom Grad der zulässigen Porosität ab.

Zwischen **Makroporosität** und **Mikroporosität** wird unterschieden:

Unter den Begriff **Makroporosität** fallen alle Poren, deren Größe und Form mit dem normalsichtigen menschlichen Auge oder einem Hilfsmittel, das eine dem menschlichen Auge entsprechende Auflösung aufweist (z. B. das Röntgen), bestimmt werden können. Dies sind Poren mit einer minimalen Ausdehnung von rund 0,5 mm und mehr.

Unter **Mikroporosität** versteht man Poren, deren Form und Größe mit dem normalsichtigen menschlichen Auge nicht zuverlässig zu beurteilen ist. Sie reicht bis zu einer maximalen Ausdehnung von 0,5 mm Durchmesser. Die minimal erfassbare Porengröße richtet sich nach der Auflösung des verwendeten Hilfsmittels.

Anforderungen bezüglich der Porosität sollen sich an den Bauteilbelastungen (statische Festigkeit, Dauerfestigkeit, Druckdichtigkeit und Funktion bearbeiteter Flächen, Beschaffenheit von rohen Gussflächen) orientieren. Die Beurteilungskriterien und -maßstäbe hierfür sind zwischen Hersteller und Abnehmer vor der Auftragserteilung festzulegen. Es kann sinnvoll sein, an einem Bauteil unterschiedliche, bereichsspezifische Porositätskriterien festzulegen, die sich eingeschränkt auf besonders definierte Bezugsflächen beziehen, siehe Anhang 2 „Porositätsbestimmung mittels quantitativer Bildanalyse“.

Zur Beurteilung der Porosität von Gussstücken gibt es unterschiedliche Prüfmöglichkeiten. Die Prüfmethode sollte in Verbindung mit der Festlegung von Beurteilungskriterien unter Berücksichtigung der Bauteilanforderungen zwischen Hersteller und Abnehmer erfolgen [1]. Die Analyse lässt sich nur von geschultem Fachpersonal durchführen und ist mit Kosten verbunden.

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die mit den nachstehend aufgeführten Prüfmethoden erreichbaren Aussagen zu verschiedenen Porositätsmerkmalen.



Bestimmungsmethode / Messgröße	visuelle Prüfung (an bearbeiteten Funktionsflächen)	Durchstrahlungsprüfung 2D (Röntgen)	Durchstrahlungsprüfung 3D (CT-Röntgen)	Ultraschallprüfung	Dichtheitsprüfung	Dichteprüfung	Schliff- und Schnittprüfung (qualitativ)	Schliff- und Schnittprüfung (quantitative Bildanalyse)
Porenanteil global [%]	-	-	X	O	-	O	-	-
Porenanteil in der Bezugsfläche [%]	O	O	X	-	-	-	O	X
Porendurchmesser/ -länge [ø]	O	O	X	-	-	-	O	X
unberücksichtigte Poren [U]	X	O	X	-	-	-	X	X
Anzahl zugelassener Poren [Z]	X	O	X	-	-	-	X	X
Abstand benachbarter Poren [A]	O	-	O	-	-	-	O	X
Porenhäufung [H]	O	-	O	-	-	-	O	X
Porennest [N]	O	O	O	-	-	-	O	X
Dichte des Gussteils	-	-	-	-	-	X	-	-
minimale auswertbare Porengröße	≥ 0,5 mm	5-6% der durchleuchteten Wandstärke	3-5% der durchleuchteten Wandstärke	keine Aussage	keine Aussage	keine Aussage	Auflösung des Mikroskops (< 0,1 mm)	Auflösung des Mikroskops (< 0,1 mm)
Art der Prüfung	Stichprobe/ 100%-Prüfung	Stichprobe/ 100%-Prüfung	Stichprobe	Stichprobe	Stichprobe/ 100%-Prüfung	Stichprobe	Stichprobe	Stichprobe
Aufwand	mittel-hoch	mittel-hoch	hoch	hoch	hoch	mittel	hoch	hoch

quantitative Messwerte	X
qualitative Messwerte	O
keine Messwerte	-

Tabelle 1: Überblick Prüfmethode/Messgrößen zur Porositätsbestimmung

4.1 DURCHSTRAHLUNGSPRÜFUNG MIT BILDVERSTÄRKER (RT)

Bei der Durchstrahlungsprüfung (Röntgenprüfung) [2, 3, 4, 13] handelt es sich um eine zerstörungsfreie Prüfung. Das Auflösungsvermögen des Prüfverfahrens ist abhängig von den zu prüfenden Wanddicken, dem Durchstrahlungsweg und -winkel sowie der Gusstückgeometrie. Bei der Röntgenprüfung wird eine zweidimensionale Projektion des Gusstücks erzeugt. Hieraus resultieren Einschränkungen bei der Lokalisierung und Identifikation von Poren. Das maximale Auflösungsvermögen herkömmlicher in Gießereien verwandter Röntgenanlagen ist abhängig von der zu durchstrahlenden Wanddicke und liegt bei einer Auflösung von ca. 5-6% der durchstrahlten Wanddicke. Defekte von 0,5 mm Größe liegen an der untersten Auflösungsgrenze.

Quantitative Aussagen über den Porenanteil in einem Gusstück sind mit der Durchstrahlungsprüfung nur stark eingeschränkt möglich. Wenn bestimmte Gusstückqualitäten zwischen Gießer und Abnehmer vereinbart werden, wird häufig mit Grenzmustern gearbeitet.

CT-Röntgen (Computer-Tomographie): Das CT-Röntgen erlaubt eine präzisere Beurteilung von Poren in definierten Querschnittsflächen. Unter Berücksichtigung des Abbildungsverhältnisses wird die Porengröße exakt wiedergegeben. Das CT-Röntgen erfordert besondere Anlagen. Abhängig von der Anzahl an geröntgten Querschnittsflächen ist der Kosten- und Zeitaufwand erheblich höher als bei der normalen Röntgenprüfung.



4.2 ULTRASCHALLPRÜFUNG (UT)

Bei der Ultraschallprüfung handelt es sich um eine zerstörungsfreie Prüfung [4]. Das Auflösungsvermögen ist abhängig von der Gussstückkontur, der zu prüfenden Wanddicke, der Gefügestruktur sowie dem Schallweg und -winkel. Bei der Ultraschallprüfung wird eine eindimensionale Projektion des Gussstücks erzeugt. Eine Gesamtübersicht über ein Bauteil kann nur durch ein Scannen des gesamten Bauteils erzeugt werden. Bei der Ultraschallprüfung können sowohl bei der Ankopplung des Schwingers als auch bei der Auswertung der reflektierten Signale (Bestimmung von Porengröße, -anzahl und -lage) Komplikationen auftreten. Deshalb ist dieses Verfahren zur Porositätsbestimmung nur in Sonderfällen anwendbar. Grundsätzlich sind Kalibrierproben erforderlich, um die Signale der Ultraschallprüfung bewerten zu können.

4.3 DICHTHEITSPRÜFUNG (LT)

Bei der Dichtheitsprüfung handelt es sich um eine zerstörungsfreie Prüfung [5, 6]. Sie wird angewendet, wenn die Druckdichtheit eines Gussstücks gefordert ist. Die Dichtheitsprüfung ist nur dann sinnvoll, wenn besondere Anforderungen an die Dichtheit eines Bauteils gestellt werden.

4.4 SICHTPRÜFUNG (VT)

Bei der Sichtprüfung handelt es sich um eine zerstörungsfreie Prüfung. Ihr Auflösungsvermögen ist von den verwendeten Prüfmitteln (z. B. Lupe) abhängig [7]. Die Sichtprüfung erfolgt an der Rohkontur des Gussstücks oder an bearbeiteten Flächen. Eine Quantifizierung der allgemeinen Porosität ist mit diesem Verfahren nicht möglich.

4.5 DICHTEPRÜFUNG

Bei der Dichteprüfung handelt es sich um eine zerstörungsfreie Prüfung. Dieses Verfahren ermöglicht nur eine Aussage über den Anteil von Volumenporosität für das gesamte Bauteil. Werden Gussstücke geschnitten (zerstörende Prüfung!) ist auch eine segmentweise Ermittlung der Volumenporosität möglich. Da die Dichteprüfung im Allgemeinen nach dem archimedischen Prinzip mit Wasser durchgeführt wird, ist es mit diesem Verfahren nicht möglich, offene Volumendefizite zu quantifizieren. Bei der segmentweisen Prüfung können Volumendefizite durch den Schnitt offengelegt werden, die dadurch mit der Dichteprüfung nicht mehr erfasst werden. Die Dichteprüfung ist allgemein als Hilfsmittel zur Fertigungsoptimierung geeignet.

4.6 SCHLIFF- UND SCHNITTPRÜFUNG

Die Schlißprüfung ist das Verfahren mit der größten Aussagefähigkeit in Bezug auf Porositäten in kritischen Bauteilbereichen. An metallografisch präparierten Schlißflächen lassen sich umfangreiche Informationen über die Ursachen und die Entstehung von Porosität ablesen. Über die Porositätsbeurteilung hinaus können mit dieser Methode weitere Gefügemerkmale (z. B. der Dendritenarmabstand) untersucht und bewertet werden.

Die Schliß- und Schnittprüfung ist ein zerstörendes Prüfverfahren. Daher werden ausschließlich Stichproben genommen. Die Beurteilung erfolgt an einem Sägeschnitt, einer grob geschliffenen Fläche, einer gefrästen oder gedrehten Fläche oder an einem metallografisch präparierten Schliß. Das Auflösungsvermögen des Verfahrens ist von der Oberflächenbeschaffenheit der betrachteten Fläche und den



zur Betrachtung verwendeten Hilfsmitteln abhängig. Die Schliff- und Schnittprüfung ermöglicht lediglich die Beurteilung der Porosität in der jeweiligen Schnittebene. In höher bzw. tiefer liegenden Ebenen kann die Porosität deutlich abweichen.

Die Schliff- und Schnittprüfung wird in der Regel nur für Bauteile mit erhöhten Anforderungen in kritischen Bauteilbereichen vereinbart.

Zu beachten ist, dass Poren bei nicht sachgemäßer Präparation (beim Sägen, Drehen, Fräsen, Schleifen und Polieren) zugeschmiert werden können. Dies kann zu Fehldeutungen/ Fehlmessungen führen.

Im Anhang 2 wird beschrieben, wie die Porosität am metallografisch präparierten Schliff quantitativ ausgewertet werden kann.

Die quantitative Porenanalyse lässt sich nur dann durchführen, wenn eine gleichmäßige Porenverteilung vorliegt, was in der Regel nur für die Gruppe der CuSnPb-Legierungen zutrifft. Alle anderen Legierungsgruppen weisen mehr oder weniger stark geprägte Makrolunker auf, die sich mit dieser Methode nicht sinnvoll quantitativ beschreiben lassen.

Diese Prüfmethode ist ein sehr aufwendiges und damit kostenintensives Prüfverfahren, das eine besondere Sorgfalt bei der Durchführung erfordert [9, 10].

4.7 EINDRINGPRÜFUNG

Zur Bewertung von Volumendefiziten in der Oberfläche kann auch die Eindringprüfung nach DIN EN 1371-1 [12] herangezogen werden, jedoch nicht für die Legierungsgruppen CuSn (Zinnbronze), CuSnZnPb (Rotguss) und CuSnPb (Kupfer-Zinn-Blei-Bronzen). Diese Legierungsgruppen neigen zu Schwindungsporosität vor allem auch in den oberflächennahen Bereichen.



5 Literaturhinweise, Normen, Richtlinien

- [1] **DIN EN 1982** Kupfer und Kupferlegierungen – Blockmetalle und Gusstücke
- [2] **DIN EN 444**
Zerstörungsfreie Prüfung, Grundlagen für die Durchstrahlungsprüfung von metallischen Werkstoffen mit Röntgen- und Gammastrahlen.
- [3] **DIN EN 12681** Gießereiwesen – Durchstrahlungsprüfung.
- [4] **DIN EN 583-1** Zerstörungsfreie Prüfung – Ultraschallprüfung – Teil 1: Allgemeine Grundsätze.
- [5] **DIN EN 1593** Zerstörungsfreie Prüfung – Dichtheitsprüfung – Blasenprüfverfahren.
- [6] **DIN EN 1779**
Zerstörungsfreie Prüfung – Dichtheitsprüfung – Kriterien zur Auswahl von Prüfmethoden und -verfahren.
- [7] **ISO 3058**
Zerstörungsfreie Prüfung – Hilfsmittel für die visuelle Prüfung (Sichtprüfung) – Auswahl von schwach vergrößernden Linsen.
- [8] **DIN EN ISO 10135**
Geometrische Produktspezifikationen – Zeichnungsangaben für Formteile in der technischen Produktdokumentation
- [9] **Pries, H.: Einsatz der quantitativen Bildanalyse zur Bestimmung der Porengehalte in Aluminium-Druckgussteilen.** Vortrag auf dem 1. Internationalen Deutschen Druckgusstag in Neuss am 13. April 2001.
- [10] **Pries, H.; Helmke, E: Einsatz der quantitativen Bildanalyse zur Bestimmung der Porengehalte in Aluminiumdruckgussteilen.** Giesserei 88 (2001) Nr.12 S.49-55
- [11] **DIN EN 1370** Prüfung der Oberflächenrauheit mit Hilfe von Vergleichsmustern.
- [12] **DIN EN 1371-1** Eindringprüfung – Teil 1: Sand-, Schwerkraftkokillen- und Niederdruckkokillengusstecke.
- [13] **DIN EN 13068-3** Zerstörungsfreie Prüfung – Radioskopische Prüfung – Teil 3: Allgemeine Grundlagen.
- [14] **DIN EN 1559-1** Technische Lieferbedingungen – Teil 1: Allgemeines.



Anhang 1 – Werkstoffspezifische Ausbildung von Poren

ANHANG 1.1 KUPFER UND KUPFER-CHROM LEGIERUNGEN

Rein-Kupfer und Kupfer-Chrom-Legierungen erstarren glatt bis rauwandig. Aufgrund der Volumenschwindung bei der Erstarrung ergibt sich daraus ein typisches Porenbild wie es in den Bildern A 1.1.1 und A 1.1.2 zu sehen ist.



Bild A 1.1.1

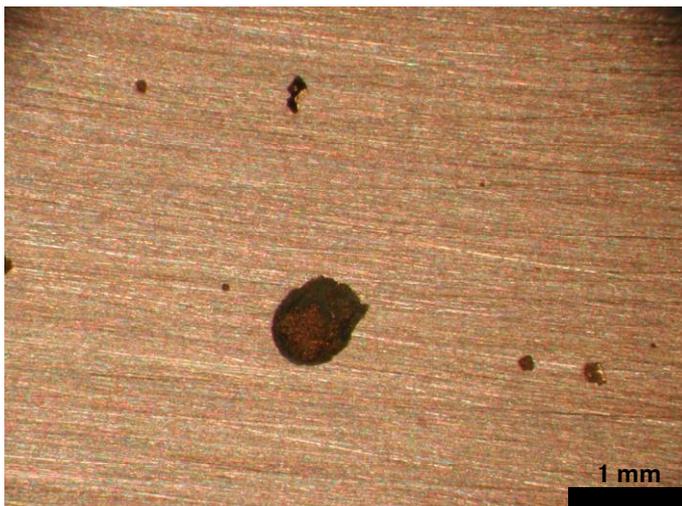
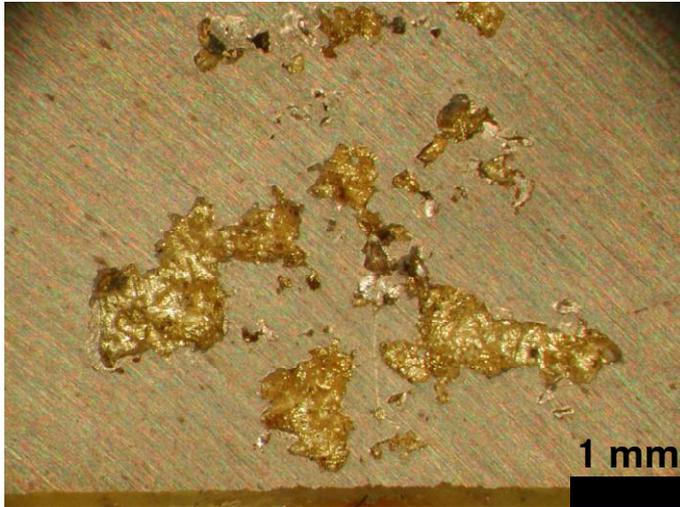


Bild A 1.1.2



ANHANG 1.2 KUPFER-ZINK LEGIERUNGEN (CUZN/MESSING)



CuZn-Gusslegierungen erstarren rauh bis schwammartig. Die bei CuZn-Gusslegierungen auftretenden Volumendefizite weisen für gewöhnlich eine unregelmäßige äußere Form auf und sind ungleichmäßig verteilt, häufig als Makrolunker. Die Poren sind in der Regel stärker verzweigt und untereinander verbunden (**Bilder A 1.2.1 und A 1.2.2**) können aber auch glatt ausgebildet sein (**Bild A 1.2.3**).

Bild A 1.2.1

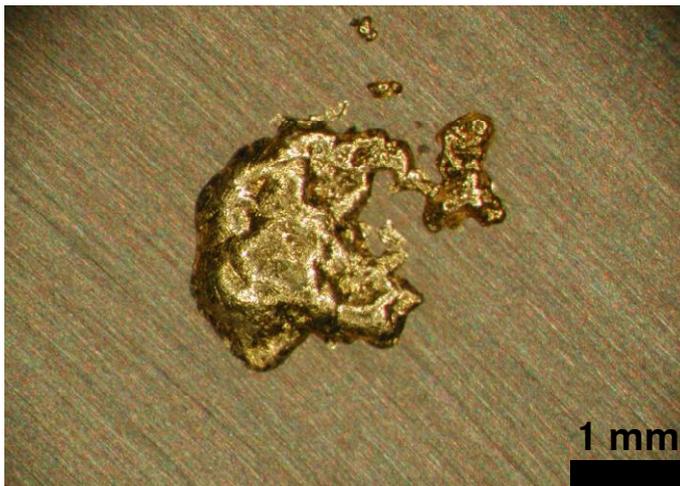


Bild A 1.2.2

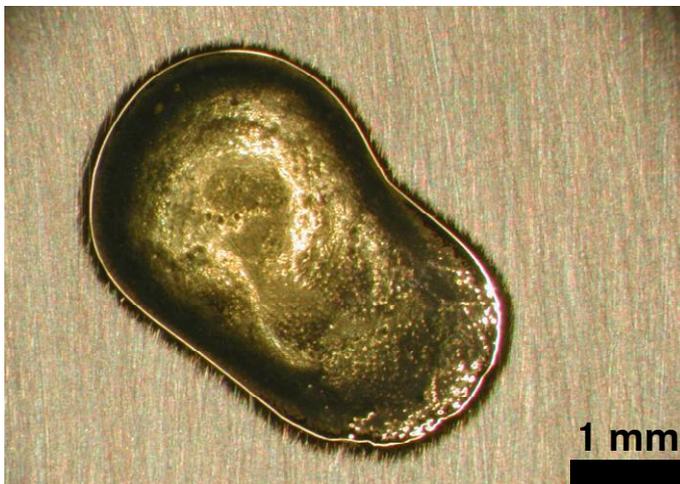


Bild A 1.2.3

ANHANG 1.3 KUPFER-ZINN LEGIERUNGEN (CUSN/ZINN-BRONZE)

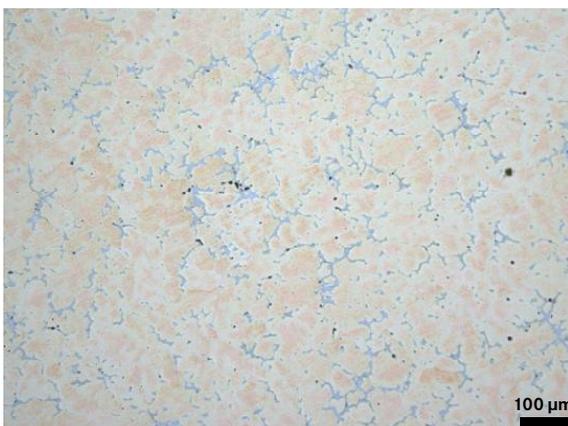
Cu-Sn Legierungen erstarren schwamm- bis breiartig. Die bei CuSn-Gusslegierungen auftretenden Volumendefizite weisen meistens eine unregelmäßige äußere Form auf und sind ungleichmäßig verteilt, häufig als Makrolunker (Bild A 1.3.1).



Bild A 1.3.1 Porenausbildung im Sandguss (CuSn 12Ni2)

Im Schleuderguss (Bild A 1.3.2 a und b) sind die Poren deutlich kleiner ausgebildet, der Porenanteil ist in der Regel sehr niedrig (< 1%).

Im Strangguss sind die Porenanteile prozessbedingt ebenfalls sehr gering. Füllbedingte Poren treten praktisch nicht auf.



(a) 100x



(b) 500x

Bild A 1.3.2: Porenausbildung im Schleuderguss (CuSn 12Ni2)



ANHANG 1.4 KUPFER-ZINN-ZINK LEGIERUNGEN (CUSNZN/ROTGUSS)

Cu-Sn-Zn Legierungen erstarren endogen breiartig. Aufgrund dieser Morphologie wird insbesondere die interdendritische Nachspeisung behindert, was zu einer verzweigten Porosität führt. Soll der Porenanteil quantitativ bestimmt werden, erschweren Blei-Phasen die Analyse, da sie Poren im metallographischen Schliff sehr ähnlich sehen sowohl in ihrer Form wie auch in ihrer Farbe (nahezu schwarz). Zur quantitativen Porenanalyse wird mindestens eine 100-fache Vergrößerung benötigt.

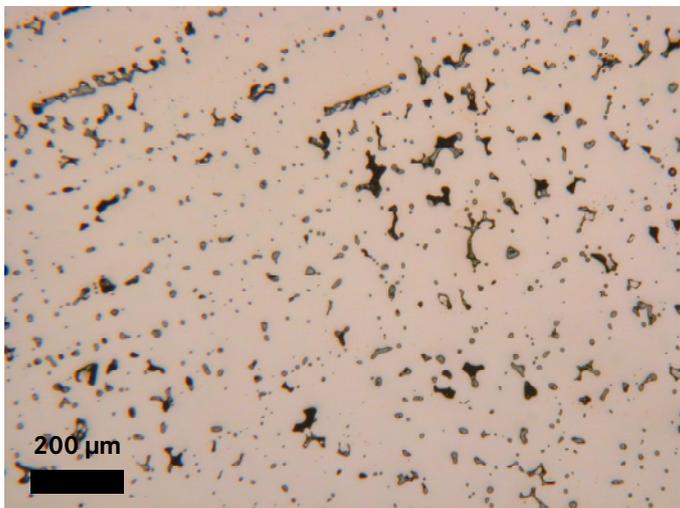


Bild A 1.4.1

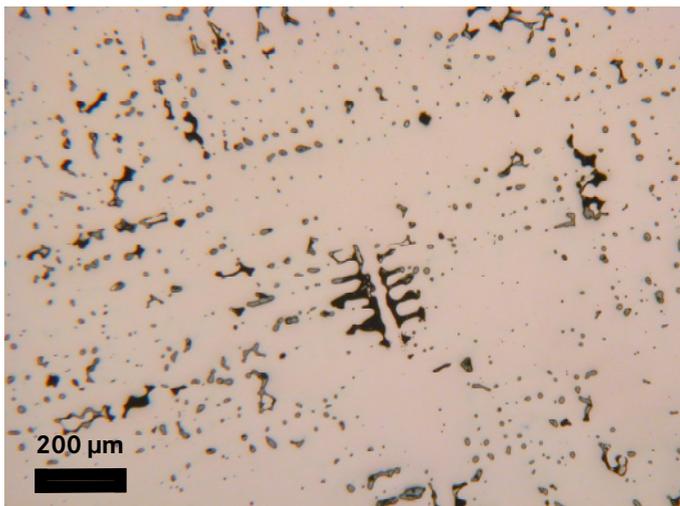
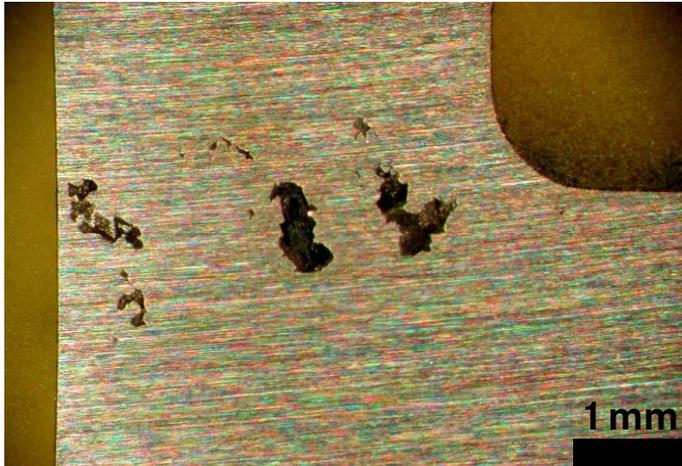


Bild A 1.4.2



ANHANG 1.5 KUPFER-ALUMINIUM-LEGIERUNGEN (CUAL/ALUMINIUM-BRONZE)



Aluminium-Bronzen haben eine rauwandige Erstarrungsmorphologie. Auftretende Schwindungsporen sind entsprechend verzweigt und miteinander verbunden, wie typischerweise in den **Bildern A 1.5.1 – A 1.5.3** gezeigt. Größe und äußere Form sind unregelmäßig.

Bild A 1.5.1

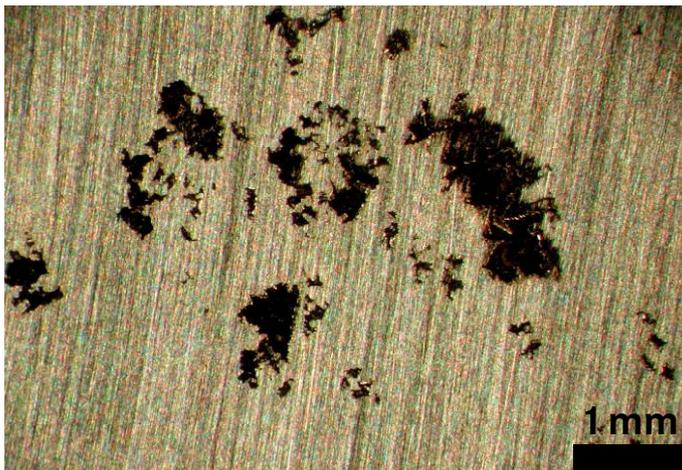


Bild A 1.5.2

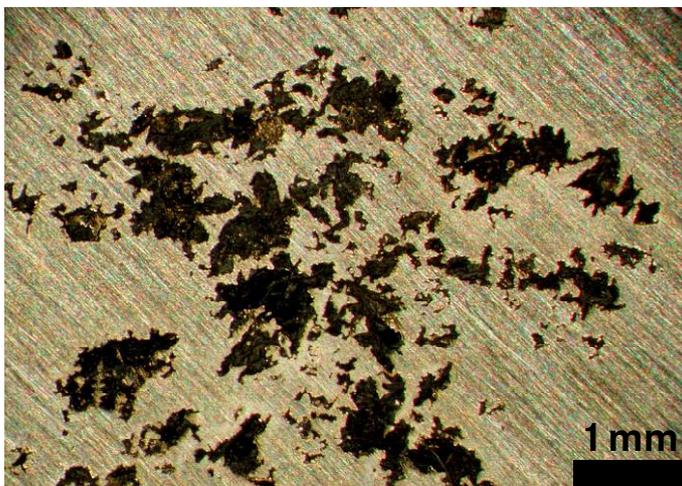


Bild A 1.5.3



Anhang 2 – Porositätsbestimmung mittels quantitativer Bildanalyse

Erfahrungsgemäß variiert die Porosität bei komplexen Bauteilen nach Lage der betrachteten Querschnitte. Größe und Form können z. T. erheblich variieren. Zur Beschreibung der Anforderungen, die bezüglich der Porosität an ein Bauteil gestellt werden, können für Teilbereiche unterschiedliche Porenklassen festgelegt werden.

Eine Orientierung darüber, welche Grenzporositäten zu vereinbaren und einzuhalten sind, lässt sich am besten erreichen, wenn zunächst die Funktionsfähigkeit des Bauteils überprüft und sichergestellt wurde. Anhand eines so überprüften Bauteils sind dann in den relevanten Querschnittsbereichen die vorliegenden Porositätsgrade zu ermitteln und daraus die zulässigen Grenzporositäten abzuleiten. Es ist zu vermeiden, dass durch zu niedrig spezifizierte Grenzporositäten funktionsfähige Gussstücke verworfen werden. Bei der Vorgabe von Grenzporositäten ist das Auflösungsvermögen des Prüfverfahrens zu berücksichtigen.

Bei der Mehrzahl der Kupfer-Gusslegierungen ist auch innerhalb einer Querschnittsfläche die Porosität nicht gleichmäßig verteilt, siehe Anhang 1. Bei Auftreten grober Makrolunker ist die nachfolgend beschriebene Methode der quantitativen Porositätsauswertung nicht anzuwenden!

Das Festlegen einer einzuhaltenden Porosität nach dieser Richtlinie zieht Prüfpflichten nach sich, deren Kostenaufwand zu bewerten ist.

A 2.1 BEZUGSFLÄCHEN FÜR DIE PORENKLASSEN

Die Schnittebenen für den Nachweis der Einhaltung der Porenspezifikation eines Bauteils sollen vorzugsweise in gegenseitiger Abstimmung zwischen Gießerei und Abnehmer vereinbart werden und sollen sich an den lokalen Beanspruchungen orientieren. Sie sind in der Bauteilzeichnung festzulegen. In diesem Sinne stellen auch bearbeitete Bauteilbereiche potentielle Schnittflächen dar.

Innerhalb der Schnittfläche werden Bezugsebenen definiert, in denen jeweils die (quantitative) Porenanalyse durchgeführt wird. Die Lage der Bezugsflächen ist so zu wählen, dass sie Querschnittsbereiche abdecken, die eine hohe Relevanz für die Funktionsfähigkeit des Bauteils aufweisen. Es kann u. U. bereits eine sehr kleine Bezugsfläche genügen, wenn diese besondere Belastungen zu tragen hat und Porositäten in diesem Bereich die Funktionsfähigkeit beeinträchtigen könnten.

Wird vereinbart, dass die Porosität mittels Mikroskop und quantitativer Bildauswertung gemessen werden soll (Schliff- und Schnittprüfung), dann soll dies bei einer Vergrößerung von 25:1 (auch 20:1 möglich) erfolgen. Höhere Vergrößerungen sind möglich, wenn die Werkstoffe dies erfordern, z. B. CuSnZnPb-Legierungen. Bedingt durch die Kameraauflösung am Mikroskop decken quadratische Einzelmessfelder in der Regel maximal eine Fläche von 3 mm x 3 mm ab. Werden größere Bezugsflächen festgelegt, kann es erforderlich werden, dass die Bezugsflächen in mehrere Einzelmessfelder unterteilt werden müssen. In diesem Fall ist darauf zu achten, dass sich die einzelnen Messfelder nicht überlappen, dass alle Messfelder einer Bezugsfläche diese vollständig abdecken und dass die Messfelder untereinander die gleiche Größe aufweisen. Die Bezugsfläche soll eine quadratische Form haben. Wird zwischen Lieferant und Abnehmer keine abweichende Vereinbarung getroffen ist das Quadrat so groß zu bemessen, dass es sich über die gesamte Bauteilwand erstreckt (Anpassung der Bezugsfläche an die örtliche Bauteilgeometrie durch Wahl des jeweils größtmöglichen, einbeschriebenen Quadrates).

Entstehen durch die Wahl einer Schnittebene kreisringartige Schnittflächen, orientiert sich die Größe der auszuwertenden Bezugsfläche an der Dicke des Kreisringes. Hierdurch wird die Regel der maximal einbeschriebenen Quadrate verletzt. Über die quantitative Bildanalyse ist jedoch eine vereinfachte Auswertung der Bezugsfläche möglich. Durch eine Subtraktion der nicht in der Gussstückquerschnittsfläche liegenden Flächenanteile von der Bezugsfläche, lassen sich die Porengehalte korrekt bestimmen.

Wird in der vereinbarten Schnittebene keine Bezugsfläche definiert, ist die Bezugsfläche so zu wählen, dass sie den Bereich der augenscheinlich größten Porosität abdeckt.

Bild A 2.1 veranschaulicht die Begrifflichkeiten Schnittebene, Bezugsfläche und Messfeld (auch als Teilfläche bezeichnet) und gibt ein Beispiel für die Festlegung der Bezugsflächen innerhalb einer Schnittebene. Im Beispielfall liegen besondere Belastungen im Bereich der Verschraubung vor, weshalb dort gezielt die Bezugsflächen 1 und 2 vereinbart worden sind. Die Bezugsfläche 3 ist ausgewählt worden wegen einer besonders hohen mechanischen Beanspruchung in dem Bereich.

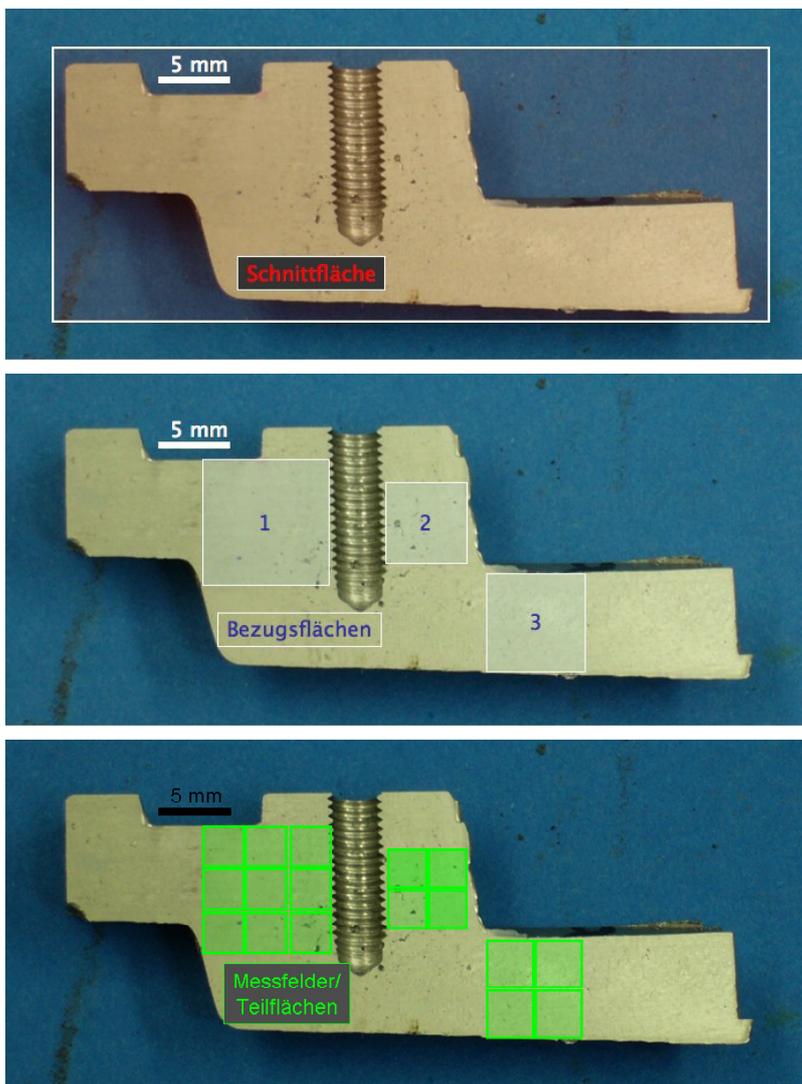


Bild A 2.1: Schnittebene eines Gussstücks mit Bezugsflächen und Messfeldern/ Teilflächen zur quantitativen Porositätsbeurteilung



A 2.2 POROSITÄTSSCHLÜSSEL

Die Vorgabe einer zulässigen Porosität erfolgt in Form eines Schlüssels. Dieser setzt sich aus mehreren Parametern zusammen. Art und Anzahl an Parametern können frei vereinbart werden, die Reihenfolge ihrer Angabe ist beliebig. An erster Stelle wird im Porositätsschlüssel die Bezeichnung der Richtlinie angegeben, gefolgt von einem Bindestrich. Es folgen die einzelnen Parameter denen jeweils ein Zahlenwert nachgestellt wird. Die Parameter und die dazugehörigen Werte werden in eckige Klammern gesetzt. Die verschiedenen Parameter werden untereinander durch Schrägstriche getrennt.

Beispiel des Porositätsschlüssels:

VDG P211-[Parameter 1][Wert]/ [Parameter 2] [Wert]/ [Parameter 3] [Wert]/ ... / [Parameter n] [Wert]

A 2.2.1 Definition und Anwendungsempfehlung der Parameter

Rauigkeit der Bezugsfläche [R_z]

Die Erkennbarkeit von Poren hängt entscheidend von der Präparation der Bezugsfläche ab. Daher ist neben den Kriterien für die zulässige Porosität auch die Güte der zur Anwendung kommenden Bezugsflächen zwischen Lieferanten und Abnehmer zu vereinbaren.

Wird die Rauigkeit im Porositätsschlüssel nicht angegeben, gilt $[R_z] = 0 \mu\text{m}$. Dies entspricht der Güte eines metallografisch präparierten Schliffes. Bezieht sich der angegebene Porositätsschlüssel auf eine Oberfläche des bearbeiteten Endproduktes, soll sie der jeweils spezifizierten Güte entsprechen.

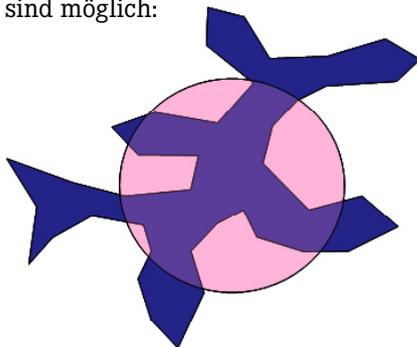
Die Bezeichnung der Porenklassen setzt sich aus folgenden Parametern zusammen:

Porenanteil [%]:

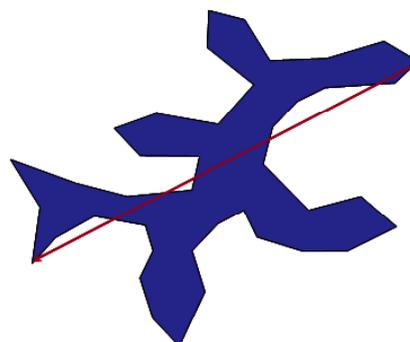
Der Porenanteil ist als maximal zulässiger Porenflächenanteil in Prozent für die vereinbarten Bezugsflächen definiert. Die Porenanteile sollen in 5% Stufen vereinbart werden. In Ausnahmefällen für zyklisch belastete Bauteile bei maximalen Porenanteilen unter 5% sind Stufen in 1% Schritten empfehlenswert.

Porendurchmesser/ Porenlänge [\emptyset]:

Die Angabe des maximalen Porendurchmessers erfolgt in mm. Folgende unterschiedliche Definitionen sind möglich:



* Äquivalentdurchmesser (Durchmesser eines flächengleichen Kreises) [\emptyset_f]



* Porenlänge (= maximaler Feret) bzw. Vergleichsdurchmesser [\emptyset_l]

Wird auf die Angabe des tiefer gesetzten Kürzels hinter dem Durchmesserzeichen verzichtet, kommt immer die Porenlänge zur Anwendung.



Abstand benachbarter Poren [A]:

Dieser Parameter gibt den Mindestrandabstand zwischen zwei benachbarten Poren an. Die Abstandsangabe bezieht sich auf den Porendurchmesser (\varnothing_F oder \varnothing_L) der kleineren zweier benachbarter Poren multipliziert mit einem ganzzahligen Wert. Der Wert ist zwischen Hersteller und Abnehmer zu vereinbaren.

Anmerkung: Die Abstandsmessung setzt eine besondere Bildanalyse-Software voraus. Die Anwendung dieses Parameters zielt besonders auf die Spezifikation von Dichtflächen ab. Bei einer rein visuellen Prüfung kommen sinnvoller Weise sogenannte Lochschablonen zum Einsatz.

Unberücksichtigte Poren [U]:

Dieser Parameter wird in der Regel für bearbeitete Dichtflächen definiert. Der Wert von [U] gibt an, bis zu welchem Durchmesser Poren bei der Bezugsflächenbeurteilung unberücksichtigt bleiben.

Anzahl der Poren [Z]:

In der Regel wird dieser Parameter für bearbeitete Dicht- und Funktionsflächen definiert. Der ganzzahlige Wert für [Z] gibt die max. zulässige Anzahl einzelner Poren in einer Bezugsfläche vor.

Porenhäufungen sind hierbei wie Einzelporen zu behandeln.

Porenhäufungen [H], [H_R] oder [H_K]:

Eine Porenhäufung liegt vor, wenn der Abstand zweier benachbarter Poren kleiner ist als der Durchmesser der kleineren Pore.

[H] (ohne Fußnote) bezieht sich auf Porenhäufungen in der gesamten Bezugsfläche.

[H_R] bezieht sich auf Porenhäufungen im Randbereich der Bezugsfläche (äußeres Wandungsdrittel),

[H_K] bezieht sich auf Porenhäufungen im Kernbereich der Bezugsfläche (inneres Wandungsdrittel),

[H], [H_R] oder [H_K] können folgende binäre Werte annehmen:

0 = Porenhäufungen unzulässig

1 = Porenhäufungen zulässig

Wird zusätzlich zur Porenhäufung ein maximaler Porendurchmesser festgelegt, sind Porenhäufungen wie Einzelporen zu behandeln. D. h., überschreitet der Durchmesser einer zunächst zulässigen Porenhäufung den maximal zulässigen Porendurchmesser, ist diese Porenhäufung unzulässig.

Anmerkung: Es empfiehlt sich, Vorgaben zu Porenhäufungen nur für Dicht- und Funktionsflächen zu machen.



PORENNESTER [N], [N_R] ODER [N_K]:

Ein Porenneester liegt dann vor, wenn der Durchmesser einer Porenanhäufung den maximal zugelassenen Porendurchmesser überschreitet.

[N] (ohne Fußnote) bezieht sich auf Porenneester in der gesamten Bezugsfläche.

[N_R] bezieht sich auf Porenneester im Randbereich der Bezugsfläche (äußeres Wandungsdrittel),

[N_K] bezieht sich auf Porenneester im Kernbereich der Bezugsfläche (inneres Wandungsdrittel),

[N], [N_R] oder [N_K] können folgende binäre Werte annehmen:

0 = Porenneester unzulässig

1 = Porenneester zulässig

Wird [N], [N_R] oder [N_K] im Porenschlüssel aufgeführt aber kein Wert angegeben, gilt automatisch der Wert 1, d. h. Porenneester sind im entsprechenden Bereich zulässig.

Anmerkung: Es empfiehlt sich Vorgaben zu Porennestern möglichst nur für innere Bereiche von Gussstückwandungen zu machen.

A 2.2.2 Beispiele für Porositätsschlüssel

Schematischer Aufbau des Porositätsschlüssels:

(Norm)-[Parameter 1][Wert]/ [Parameter 2] [Wert]/ [Parameter 3] [Wert]/ .../[Parameter n] [Wert]

Beispiel 1: **VDG P211- %15/ Ø_L3/N_K1**

Für die vereinbarten Bezugsflächen ist eine Porosität von 15% zugelassen. Eine Porenlänge von 3 mm darf nicht überschritten werden. Porenneester sind im Kernbereich (inneres Wandungsdrittel) erlaubt.

Beispiel 2: **VDG P211- %5/ Ø_L1/H0**

Für die vereinbarten Bezugsflächen ist eine Porosität von 5% zugelassen. Eine Porenlänge von 1 mm darf nicht überschritten werden. Porenanhäufungen sind nicht erlaubt.

Beispiel 3: **VDG P211- %10 /Ø_F3/R_Z15**

Für die vereinbarten Bezugsflächen ist eine Porosität von 10% zugelassen. Ein Äquivalentdurchmesser von 3 mm darf nicht überschritten werden. Die Bezugsfläche hat eine Oberflächengüte mit einer Rauhtiefe R_Z von ca. 15 µm.

Beispiel 4: Für eine bearbeitete Dichtfläche (Gussstück aus Beispiel 3) gilt spezifisch im Bereich der „Dichtsickenbreite ± 1 mm“: **VDG P211- Z4/Ø_L2/U0,5/A2**

In der vereinbarten Bezugsfläche (hier: Dichtfläche) sind – unter Berücksichtigung der angegebenen Dichtsickenbreiten von ± 1 mm – maximal 4 Poren zulässig. Dabei darf die maximale Porenlänge 2 mm nicht überschreiten. Poren bis einschließlich 0,5 mm Durchmesser bleiben unberücksichtigt. Der Abstand zweier benachbarter Poren muss mindestens den Durchmesser der kleinsten beider Poren multipliziert mit dem Faktor 2 aufweisen.



A 2.3 EINTRAGUNG IN ZEICHNUNGEN

In Zeichnungen sind entsprechend Kapitel A 2.1 für die vereinbarten Bezugsflächen oder für das gesamte Bauteil Porositätsfestlegungen vorzunehmen.

A 2.3.1 Kollektive Eintragung

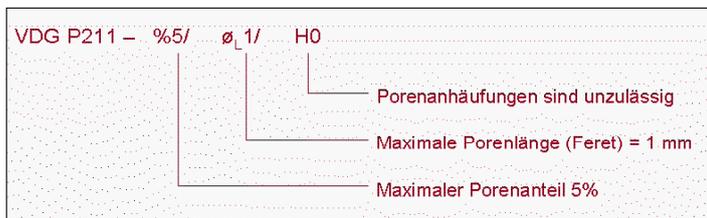
Unter kollektivem Eintrag ist zu verstehen, dass der Porenflächenanteil sich auf beliebige Querschnitte im Gussstück bezieht. Er kann dann sinnvoll sein, wenn damit ein konstruktiv erforderliches allgemeines Mindest-Porositätsniveau für das gesamte Bauteil definiert werden soll.

Wenn erforderlich, dürfen für spezielle Bauteilbereiche abweichende Festlegungen getroffen werden. Die Definition der Bezugsflächen soll vorzugsweise in gegenseitiger Abstimmung zwischen Hersteller und Abnehmer erfolgen. Die kollektive Zeichnungseintragung erfolgt in der Nähe des Zeichnungsschriftfeldes.

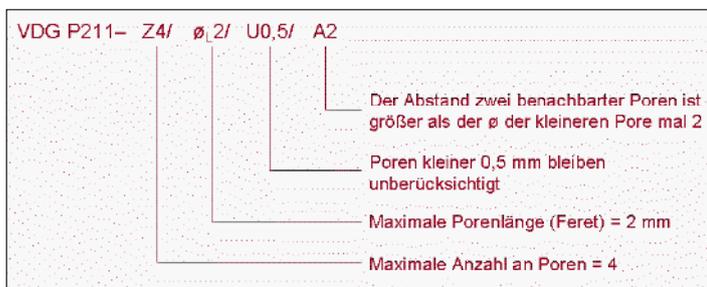
Bei einer kollektiven Eintragung ist zu beachten, dass Porositäten stark querschnittsabhängig sind. Insbesondere bei lokal begrenzt möglichen großen Wandstärkenunterschieden sind niedrige Porenanteile gießtechnisch nicht einhaltbar. Dementsprechend sind bei einem kollektiven Eintrag die Grenzen für die Porenanteile ausreichend hoch zu setzen. Es ist zu vermeiden, dass durch zu niedrig spezifizierte Grenzporositäten funktionsfähige Gussstücke verworfen werden.

A 2.3.2 Eintragungen für definierte Bereiche

Eintragungen für definierte Bereiche sind dann sinnvoll, wenn z. B. lokal höhere Beanspruchungen vorliegen oder eine Funktionsfläche es erfordert. Gemäß dieser Richtlinie soll die Eintragung mit örtlichem Bezug wie folgt ausgeführt werden:



VDG P211- %5/ Ø1/ H0 (Beispiel 2 aus Kap. A 2.2.2)



VDG P211- Z4/ Ø2/ U0,5/ A2 (Beispiel 4 aus Kap. A 2.2.2)

In der Nähe des Schriftfeldes der Zeichnung ist auf die BDG-Richtlinie P211 gegebenenfalls mit einer kollektiven Eintragung nach A 2.3.1 hinzuweisen.



Anhang 3 – Definition weiterer Fehlstellen

A 3.1 KALTFLIESSSTELLEN

Kaltfließstellen sind Muster, die die Grenze verschiedener Formfüllströme auf der Gussstückoberfläche darstellen.

A 3.2 ZIEHRIEFEN

Ziehriefen sind örtliche Werkstoffabträge, die wie Riefen und Kratzer an der Gussstückoberfläche (parallel zur Ausformrichtung) aussehen und die beim Entformen und Ziehen der Kerne durch das Reiben der Werkstoffe aneinander entstehen.

A 3.3 GRATE

Bei Graten wird unterschieden in Gießgrate und Grate, die bei mechanischer Bearbeitung, wie z. B. Entgratpressen, Fräsen, Bohren usw. durch Verformung des bearbeiteten Werkstoffes entstehen. Beim Gießgrat handelt es sich um am Gussstück anhaftende dünnwandige Metallreste, die beim Gießen durch das Eindringen der Schmelze in die Formteilung oder in Passfugen von Formeinsätzen oder Kernen entstehen.

A 3.4 BRANDRISSMUSTER

Brandrissmuster kennzeichnen sich durch eine spinnwebenartige, erhabene Struktur an der Gussstückoberfläche. Ihre Ursache liegt in einer dauerhaften Schädigung der Dauerform durch Risse (Brandrisse). Diese Risse in den Formen entstehen in Bereichen mit besonders hoher Temperaturwechselbeanspruchung.

A 3.5 WEITERE FEHLERMERKMALE GEGOSSENER BAUTEILE

Maßabweichung, unvollständige Formfüllung, Volumenschwankungen, Verzug, Einschlüsse, Auswerfermarken, Fließlinien, Gewaltrisse und gefleckte Oberfläche sind weitere Fehlermerkmale von Gussstücken.