

METALLURGISCHE EINFLÜSSE AUF DIE UMFORMBARKEIT VON STÄHLEN

B. Buchmayr^{1*} und C. Bernhard²

¹ Lehrstuhl für Umformtechnik, Montanuniversität Leoben

² Lehrstuhl für Metallurgie, Montanuniversität Leoben

Franz-Josef-Straße 18, A-8700 Leoben;

Bruno.Buchmayr@mu-leoben.at

Christian.Bernhard@mu-leoben.at;

ZUSAMMENFASSUNG: Die Prozesskette von der Schmelze zum fertigen Bauteil umfasst einige sehr wesentliche metallurgische Einzelprozesse, die das spätere Bauteil nachhaltig beeinflussen. Heterogenitäten in der Gefügeausbildung, aber auch in der Verteilung der Legierungselemente beeinflussen dabei auch das Umform- und Duktilitätsverhalten mit unterschiedlicher Wirkung. Eine zuverlässige Beurteilung der Auswirkungen von Ungängen, Mischkorn, Korngrenzenbelegungen, Seigerungszone u.a.m. auf das mechanisch-technologische Bauteilverhalten ist zur Zeit nur qualitativ möglich, wäre aber zur Bewertung von Stranggussqualitäten, direkt gewalzten Bändern (ESP-Prozess) oder von älteren Stahlgusskomponenten dringend notwendig. Wie sollen Ungängen, Seigerungszone, Porenester etc., die im Zuge der zFP gefunden wurden, bewertet werden? Wie viele Umformschritte bzw. Umkörnprozesse sind notwendig um eine den Belastungen ausreichend genügende Mikrostruktur zu erhalten? Reicht das verbleibende Umformvermögen für den sicheren Betrieb heterogener Stahlgusskomponenten? Im Paper wird versucht diese alte Problemstellung im Bewusstsein neuer Untersuchungsmethoden und Werkstoffkenntnisse erneut aufzuwerfen.

ABSTRACT: The processing chain from the melting stage to the final engineered component needs a lot of essential metallurgical steps, which may have an influence on the final component. Microstructural heterogeneities and inhomogeneous distributions of alloying elements affect formability and ductility in a different way. A reliable assessment of the effect of defects, microstructure with mixed grain sizes, precipitates on grain boundaries, segregation zones etc. is only qualitatively feasible at the moment. However a more detailed knowledge would be necessary for assessment of the reliability of continuous castings, direct rolled strips (ESP-process) or for old steel castings. How can defects, segregations, clusters of pores etc. be assessed, after they were found by NDT? How many passes or transformation processes are needed to be good enough for specific component requirements? Is the remaining ductility sufficient for a safe component life. In the paper, this old task is reconsidered under the aspects of new testing and materials knowledge.

SCHLÜSSELWÖRTER: Metallurgische Einflüsse, Primärgefüge, Gefügeheterogenitäten, Formänderungsvermögen, Beurteilung lokaler Schwachstellen

1 EINLEITUNG

Unter dem Formänderungsvermögen oder auch Umformvermögen versteht man die Fähigkeit eines Werkstoffs, sich vor dem Bruch plastisch zu verformen. Diese Eigenschaft ist für das Bruchverhalten vieler Sicherheitsbauteile, aber auch für die prozesssichere Herstellung komplexer Bauteilgeometrien mit hohem Umformgrad von besonderer Bedeutung. Neben der Umformtemperatur, Umformgeschwindigkeit und dem Spannungszustand (hydrostatischer Druckanteil) haben auch der Gefügestand und einige chemische Elemente

wesentlichen Einfluss auf das Umformverhalten. In dieser Arbeit sollen aber primär nur die metallurgischen Einflüsse auf die Umformbarkeit von Stählen betrachtet werden. Obwohl die Duktilität bei höheren Temperaturen (im Bereich der Solidus- und der Umwandlungstemperatur) auch von großer industrieller Bedeutung ist, wollen wir uns hier primär auf die Auswirkungen bei Raumtemperatur beschränken. Damit soll auch die Möglichkeit geschaffen werden, den Einfluss der Stranggussqualität, einer Wiedererwärmung und damit Umkörnung, eines Direkteinsatzes von Dünnbrammen

* Korrespondierender Autor: Franz-Josef-Straße 18, 8700 Leoben, +43-3842-402-5600, Fax 5602, bruno.buchmayr@mu-leoben.at

und der nachfolgenden Warmwalzprozesse, sowie auch die unterschiedlichen Heterogenitäten von Stahlgusskomponenten hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf das betriebliche Bauteilverhalten besser bewerten zu können.

2 HETEROGENITÄTEN IM PRIMÄR-GEFÜGE – ENTSTEHUNG UND MÖGLICHE BEEINFLUSSUNG

Die mechanisch-technologischen Eigenschaften sind primär von der Stahlzusammensetzung und vom Gefügestand abhängig, wobei sich der Gefügestand und damit die Bauteileigenschaften im Zuge der Herstellung aber auch im Verantwortungsbereich des Stahlanwenders mehrmals verändern können, siehe Abbildung In der Arbeit werden zunächst die wesentlichen Gefügeheterogenitäten, die sich auf das Bauteilverhalten auswirken hinsichtlich ihrer Entstehung und Bedeutung erläutert. Dazu werden auch Maßnahmen zur Vermeidung bzw. zur Abschwächung der schädlichen Wirkung auf das mechanische Bauteilverhalten aufgezählt. Daran anschließend werden dann die Auswirkungen der metallurgischen Einflüsse auf das Bauteilverhalten behandelt.

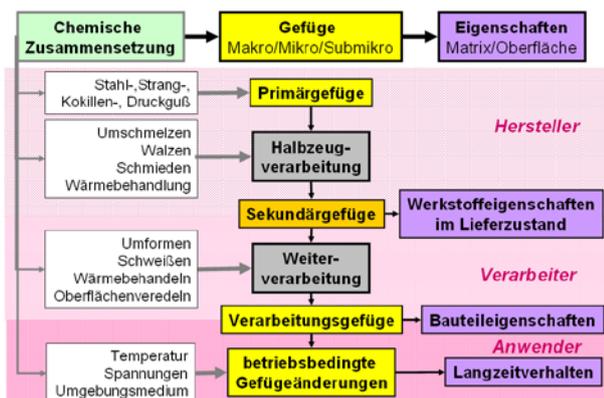


Abbildung 1: Veränderung des Gefüges und damit der Eigenschaften im Zuge der Herstellung, Verarbeitung und Anwendung.

2.1 CHARAKTERISIERUNG DER PRIMÄREN GEFÜGEHETEROGENITÄTEN

Das Halbzeug wird im Zuge seiner Herstellung mit einer Reihe von Heterogenitäten belastet, deren Ursprung in der Primär- und Sekundärmetallurgie, aber vor allem im Gießprozess zu suchen ist.

Aus der Primär- und Sekundärmetallurgie stammen

- ungünstig hohe Gehalte an Spuren- und Begleitelementen die in Kombination mit ungeeigneter Prozessführung in den nachfolgenden Produktionsschritten zu Problemen führen können sowie
- nichtmetallische Einschlüsse.

Die Wirkung nichtmetallischer Einschlüsse ist von ihrer Herkunft, Größe, Form, Anzahl, Zusammensetzung und Verteilung abhängig.

- Die Sekundärmetallurgie führt im Normalfall zu einer regulären und deshalb steuerbaren Einschlussgrößenverteilung und zu Einschlüssen deren chemische Zusammensetzung das System Stahl/Schlacke/Feuerfest und den Prozessablauf der Sekundärmetallurgie (z.B. Desoxidation, Vakuumbehandlung, Reinheitsgradspülen etc.) abbildet. Der sekundärmetallurgische Prozess ist darauf abgestimmt den Zielwert, also den Reinheitsgrad, zu erreichen. Die im Stahl verbleibenden Einschlüsse können jedoch ungleichmäßig im Halbzeug verteilt sein, ein Problem das alle Gießverfahren betrifft [z.B. 1].
- Im Zuge des Vergießens kann es zur Bildung von makroskopischen Einschlüssen kommen, Reoxidation, Clogging oder das Einziehen von Gießpulverschlacke seien an dieser Stelle als Beispiele genannt [1].
- Die Bildung von lokalen Konzentrationsanreicherungen kann auch bei der Erstarrung zur Ausscheidung von Einschlüssen führen [z.B. 2].

Der Großteil der Heterogenitäten im Halbzeug entsteht während der Erstarrung und nachfolgenden Abkühlung, dazu zählen:

- Gerichtet und ungerichtet erstarrende dendritische Strukturen,
- Konzentrationsunterschiede auf mikro-, meso- und makroskopischer Ebene [3, 4],
- damit verbunden die Bildung von Poren und Lunkern und die Ausscheidung unerwünschter Einschlüssen [3],
- sowie die Bildung von Anreicherungen und Ausscheidungen an Korngrenzen, besonders kritisch in Zusammenhang mit Grobkornbildung [z.B. 5, 6].

Neben den regulären Heterogenitäten kann es auch zur Bildung von Oberflächenfehlern wie tiefen Oszillationsmarken [7], Einziehungen und Rissen kommen [5]. Auch die Innenqualität kann durch die Bildung von oberflächennahen Rissen und Innenfehlern beeinträchtigt sein [8].

2.2 METALLURGISCHE MASSNAHMEN ZUR VERBESSERUNG DER GUSSQUALITÄT IM GIESSPROZESS

Die Kontrolle der Bildung von Heterogenitäten im Halbzeug hat vor allem im Stranggießprozess einen hohen Standard erreicht. Hier werden Auslegung und Betriebsweise stahlsortenspezifisch über moderne Automatisierungskonzepte abgestimmt [z.B. 9].

Die Zusammenhänge zwischen Qualitätsmerkmalen und Beeinflussungsmöglichkeiten im Stranggießprozess wurden bereits in den 1980er Jahren durch M.M. Wolf vereinfachend zusammengefasst, Abbildung 2 [10].

Im stationären Zustand wird der Reinheitsgrad überwiegend in der Sekundär- und Tundishmetallurgie, sowie durch Reoxidationsschutz, Tauchausgussgeometrie und geometrische Faktoren der Stranggießanlage

geprägt. Wie im letzten Kapitel ausgeführt, spielen singuläre Ereignisse wie Clogging eine besonders unangenehme Rolle: Clogging kann im Betrieb zwar aus einer sich verändernden Position des Stopfens erkannt, aber nur schwer in eine eindeutige Aussage über den makroskopischen Reinheitsgrad des vergossenen Halbzeugs übertragen werden [1].

Die Oberflächeneigenschaften des Halbzeugs werden in der Kokille sowie durch die nachfolgende Abkühlung und Verformung des Stranges bestimmt. Dies schließt neben der Bildung von Fehlern auch das Gefüge und die Ausscheidung und die Anreicherung unerwünschter Spurenelemente an Korngrenzen ein.

Die Innenqualität, Sammelbegriff für alle Konzentrationsunterschiede, die Erstarrungsstruktur, Heißrisse und Heißrisseigerungen wird durch die Überhitzung, die Bedingungen in Kokille und Sekundärkühlzone sowie während der Enderstarrung bestimmt. Techniken, wie das elektromagnetische Rühren oder die Softreduction sind heute Voraussetzung für eine ausgezeichnete Innenqualität [4].

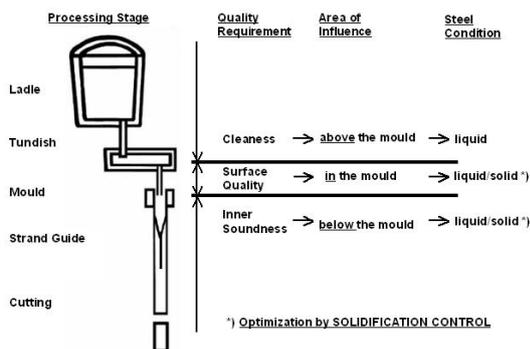


Abbildung 2: Metallurgische Einflüsse und Maßnahmen zur Verbesserung der Halbzeugqualität im Gießprozess [10]

Eine Reihe der oben genannten, die Weiterverarbeitbarkeit und auch die Produkteigenschaften meist negativ beeinflussenden Heterogenitäten kann nur mit hohem Aufwand ausgeglichen werden.

Insbesondere gilt dies für unerwünschte nichtmetallische Einschlüsse aber auch für Konzentrationsunterschiede auf meso- und makroskopischer Ebene. Diese können nur durch ein nachträgliches Wiederaufschmelzen (z.B. Elektro-Schlacke-Umschmelzen) positiv beeinflusst werden. Eine weitere Möglichkeit bietet eine Glühbehandlung bei hohen Temperaturen. Beide Behandlungen erfordern jedoch einen hohen Aufwand und sind deshalb nur für Stähle für außergewöhnliche Anforderungen (z.B. Luft- und Raumfahrt, Energemaschinenbau) wirtschaftlich sinnvoll.

2.3 STRUKTURÄNDERUNGEN ALLEINE DURCH THERMISCHE EFFEKTE

Bereits die Abkühlung auf Raumtemperatur und die damit verbundenen Phasenumwandlungen reichen aus um das aus der Erstarrung und Abkühlung des Halbzeugs entstehende Grobkorn umzuwandeln und bei der Wiedererwärmung zu einem feinkörnigen Ausgangszustand für die nachfolgende Warmumformung zu führen. Ausscheidungen und Anreicherungen liegen nicht mehr bevorzugt an den Korngrenzen und werden dadurch weniger schädlich.

Beim direkten Verbund von Gieß- und Walzprozess fehlen diese Umwandlungen. Die Voraussetzungen für die nachfolgende thermomechanische Umkörnung sind deshalb unterschiedlich, die Walzparameter anders zu wählen und Stähle in ihrer Zusammensetzung abzuwandeln [11].

2.4 GEFÜGEÄNDERUNGEN DURCH THERMOMECHANISCHE BEHANDLUNG

Die statische und dynamische Rekristallisation sind die wesentlichen Mechanismen zur Einstellung gut umformbarer Gefügestände. Durch Nutzung des thermomechanischen Walzens kann sehr feinkörniges Gefüge mit sehr guten Duktilitätseigenschaften erreicht werden. Die Gefügefinesse kann auch noch durch höhere Abkühlgeschwindigkeiten erhöht werden.

Es soll hier aber auch betont werden, dass durch die mehrmalige Rekristallisation und Umkörnung zwar das Gefüge feiner wird, aber evtl. vorhandene Konzentrationsunterschiede nicht ausgeglichen werden. Diese führen aber in der Regel zu einer Gefügezeitigkeit (bspw. Ferrit/Perlit-Bänderstrukturen), die insbesondere bei Belastungen quer zur Walzrichtung stark reduzieren kann.

2.5 GEFÜGEÄNDERUNGEN DURCH UMSCHMELZEN

Erstarrungsbedingte makroskopische Block- oder Mittenseigerungen beim Strangguss können durch den Seigerungsgrad beschrieben werden, wobei Elemente wie C, Mn, Mo und V üblicherweise sehr stark seignern. Dadurch ergeben sich lokale Unterschiede in den Verformungsfähigkeiten [12]. Eine kostspielige aber wirkungsvolle Abhilfe durch Seigerungsausgleich stellt das Elektroschlackeuumschmelzen (ESU) -Verfahren dar.

3 AUSWIRKUNGEN LOKALER SCHWACHSTELLEN AUF DAS BAUTEILVERHALTEN

Die Beurteilung von lokalen Schwachstellen ist in erster Linie abhängig vom Beanspruchungsprofil und von der Art und Größe der Schwachstelle. Eine Übersicht der

gusstypischen Fehlererscheinungen geben die Literaturstellen [13 bis 17]. Hinsichtlich des Betriebsverhaltens werden meist betrachtet:

- Statische Schwächung des Tragverhaltens (geringerer Restquerschnitt, lokal reduzierte Bruchdehnung, Reduktion der Bruchzähigkeit, erhöhte lokale Spannungsintensität etc.)
- Verbleibendes Umformvermögen (Restduktilität)
- Dynamisches Verhalten (Kerbschlagzähigkeit, Restlebensdauer, Rissfortschrittschwindigkeit, lokale Dauerfestigkeit etc.)

3.1 GEFÜGEBEDINGTE EINFLÜSSE AUF DAS UMFORMVERHALTEN

Gussgefüge (Block- oder Strangguss) unterscheiden sich von der Struktur von Knetlegierungen schon allein aufgrund der Größe und Form der Kristallite, weshalb im „as-cast“-Zustand deutliche Duktilitätsunterschiede messbar sind. Als bestgeeignete Kenngröße zur Beschreibung des Formänderungsvermögens massiv umgeformter Teile kann die Brucheinschnürung angesehen werden, weshalb hierin meist Zusammenhänge mit dem Z-Wert dargestellt werden.

Prinzipiell kann gesagt werden, dass bereits eine einmalige Umkörnung eines Stahlgussgefüges (durch normalisierende Glühung) zu einer deutlichen Verbesserung und zu einer Annäherung der Eigenschaftswerte an die Werte von Schmiede- oder Walzprodukten führt. Schmiedelegerungen weisen zwar dann aufgrund der Streckung und einer mehrmaligen Rekristallisation erhöhte Z-Werte in Längsrichtung auf, die Werte für die transversale Richtung sind aber meist schlechter als die Werte eines Stahlgusses nach Wärmebehandlung. Beim Stranggießen kann durch eine sog. Soft-Reduction die Korngröße im Mittenbereich reduziert und damit die Duktilität verbessert werden.

Treten aber Mischgefüge aus Bainit und Martensit bzw. Ferrit-Perlit und Martensit auf, so wird bei gleichem Festigkeitsniveau die Duktilität signifikant schlechter, siehe Abbildung 3.

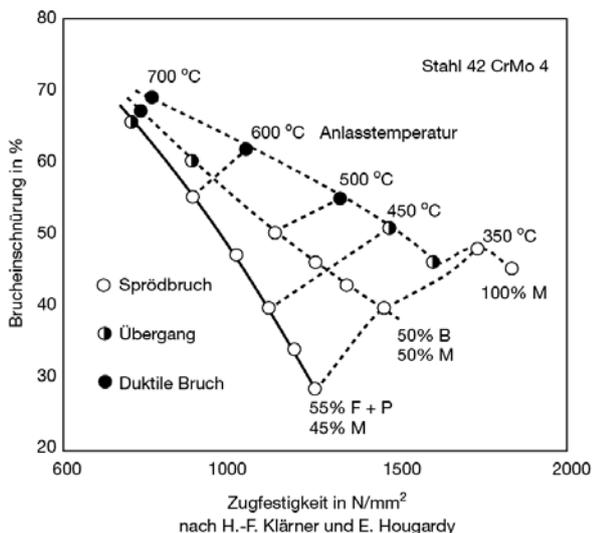


Abbildung 3: Einfluss eines Mischgefüges auf die Duktilität eines Vergütungsstahles

3.2 VERUNREINIGUNGEN UND IHRE AUSWIRKUNGEN AUF DAS BAUTEILVERHALTEN

3.2.1 Auswirkungen der Elemente S, O, C, N und P

In Tabelle 1 sind die o.g. Elemente, ihre Erscheinungsformen und ihre Auswirkung auf die mechanischen Eigenschaften nach [18] zusammengefasst. Eine Übersicht über die Wirkung nichtmetallischer Einschlüsse auf die mechanischen Stahleigenschaften wurde in [19] gegeben.

Tabelle 1: Wirkung von Verunreinigungen [18]

| Element | Form | Mechanical properties affected |
|---------|----------------------------------|--|
| S,O | Sulfide and oxide inclusions | <ul style="list-style-type: none"> • Ductility, Charpy impact value, anisotropy • Formability (elongation, reduction of area and bendability) • Cold forgeability, drawability • Low temperature toughness • Fatigue strength |
| | | |
| C,N | Solid solution | • Solid solubility (enhanced), hardenability |
| | Settled dislocation | • Strain aging (enhanced), ductility and toughness (lowered) |
| | Pearlite and cementite | • Dispersion (enhanced), ductility and toughness (lowered) |
| | Carbide and nitride precipitates | <ul style="list-style-type: none"> • Precipitation, grain refining (enhanced), toughness (enhanced) • Embrittlement by intergranular precipitation |
| P | Solid solution | <ul style="list-style-type: none"> • Solid solubility (enhanced), hardenability (enhanced) • Temper brittleness • Separation, secondary work embrittlement |

Erhöhte Schwefelgehalte reduziert sehr stark das Formänderungsvermögen. Mit zunehmendem Mn/S-Verhältnis kann die minimale Brucheinschnürung erhöht werden. Mangansulfide erhöhen die Kerbwirkung, weshalb auch die Lage und Größe der Sulfide zur Beanspruchungsrichtung entscheidenden Einfluss auf das Verformungsverhalten ausübt. Die Brucheinschnürung und auch die Ermüdungslebensdauer sinkt sehr stark mit dem Gehalt an sulfidischen oder auch oxidischen Einschlüssen, siehe Abb. 4, 5 und 6.

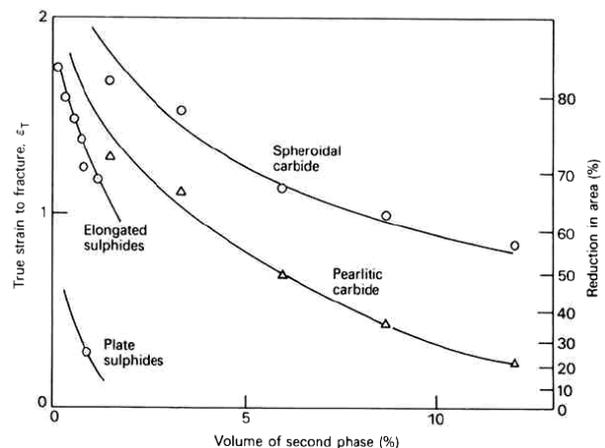


Abbildung 4: Einfluss des Gehaltes an Karbiden und Sulfiden auf die Brucheinschnürung (nach Gladman).

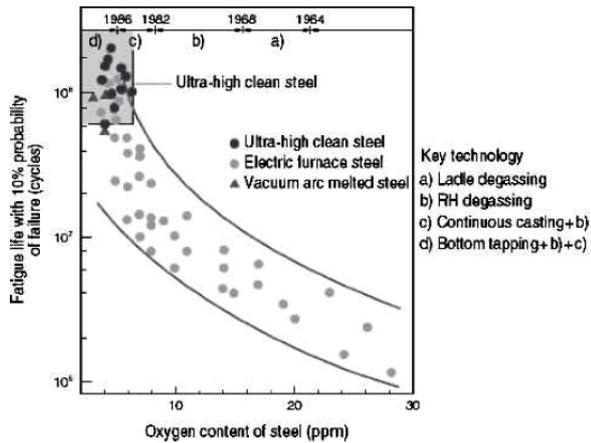


Abbildung 5: Einfluss oxidischer Einschlüsse auf die Ermüdungslebensdauer [20]

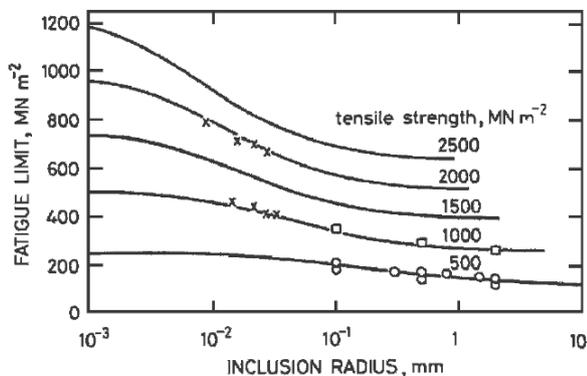


Abbildung 6: Einfluss der Einschlussgröße und der statischen Festigkeit auf die Dauerfestigkeit [20]

Die interstitiellen Atome C und N wirken im gelösten Zustand aber auch als Ausscheidungen negativ auf das Formänderungsvermögen. Bei Stickstoff ist noch auf die schädliche Wirkung im Bereich der Blausprödigkeit (200 bis 300°C) hinzuweisen [21]. Extrem starken Einfluss auf die Brucheinschnürung hat der Wasserstoff, insbesondere bei Festigkeitswerten über 850 MPa. Bei 1000 MPa kann durch H-Gehalte kleiner 2ppm die Brucheinschnürung von über 40 auf unter 10% abfallen [22].

3.2.2 Makro- und Mikroseigerungen

Die positive Wirkung eines Elektroschlackeumschmelzens hinsichtlich Seigerungsgrad und damit auf die Brucheinschnürung zeigt Abb. 7.

Warmumformprozesse (Walzen, Schmieden...) wirken hingegen aufgrund der Beeinflussbarkeit des Stoffflusses. So können Seigerungsstreifen durch mehrstufige Umformung mit wechselnder Beanspruchungsrichtung (Bsp. Querwalzen) in ungerichtete Schwachstellen überführt werden. In Fällen von Primärgefügen mit stark ausgeprägten, spröden Karbidnetzwerken kann dieser Ansatz ebenso erfolgreich eingesetzt werden. Optimale Fließlinien sind entsprechend der Ausgangsorientierung der Seigerungen zu wählen.

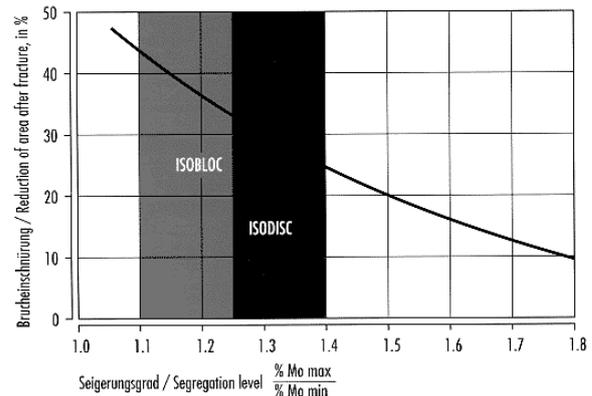


Abbildung 7: Einfluss des Seigerungsgrades auf die Brucheinschnürungswerte (Quelle: Böhler Edelstahl).

3.3 KORNGRENZENBELEGUNGEN UND PHASENGRENZEN

Eine Beeinträchtigung der Umformbarkeit ist auch dann signifikant gegeben, wenn bspw. die Korngrenzen mit Ausscheidungen belegt sind. Typisch für Stahlguss können Zementit-Belegungen der Korngrenzen sein. Weiters können auch zweite, meist härtere Phasen zu einer Rissbildung an der Phasengrenze (bspw. bei ferritisch-perlitischen Gefügen) und damit zu einer schlechteren Umformbarkeit führen.

3.4 AUSWIRKUNG VON MIKROLUNKERN

Schwindungsbedingte Hohlräume (Lunker) sind nur über die Speiser-Technologie kontrollierbar. Treten derartige Gußfehler auf, so werden ab einer bestimmten Größe Reparaturschweißen durchgeführt. Ist eine Schweißreparatur nicht möglich, so muss durch bruchmechanische „fitness-for-purpose“-FE-Rechnungen die Tragfähigkeit bzw. die Bauteilsicherheit ermittelt werden.

4 BEURTEILUNGSMETHODIK

Die industrielle Anwendung bruchmechanischer Konzepte vor dem Hintergrund internationaler Bewertungsvorschriften wird in [23] übersichtlich beschrieben.

Für Bauteile mit rissähnlichen Fehlerbildern (Lunker, Poren, Einschlüsse etc.) ermöglicht die FKM-Richtlinie „Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile“ [24] einen rechnerischen Nachweis der statischen Festigkeit und der Ermüdungsfestigkeit (Dauer- oder Betriebsfestigkeitsnachweis). Andere rechnerische Nachweise wie beispielsweise der Sprödbrechtsicherheit, der Stabilität, der Standsicherheit oder der Verformung unter Last, oder auch experimentelle Festigkeitsnachweise sind nicht Gegenstand der Richtlinie.

4.1 BEURTEILUNG VON STAHLGUSS-FEHLERN

Die Bedeutung der Beurteilung von unvermeidbaren Fehlern in Stahlgussbauteilen hinsichtlich max. zulässiger Fehlergrößen und –verteilungen wurde in Ref. [25] anschaulich dargestellt. Dabei wurde die Wirkung der Fehler auf die statische Festigkeit und die Lebensdauer bei Ermüdungsbelastung beurteilt. Der bruchmechanische Nachweis wurde nach dem R6-Konzept und der Ermüdungsnachweis nach Eurocode 3 mit Wöhlerlinien für den Werkstoff mit stahltypischen Fehlern durchgeführt.

4.2 BEURTEILUNG DER AUSWIRKUNGEN AUF DAS BLEIBENDE UMFORMVERMÖGEN

Im Gegensatz zu den „fitness-for-purpose“-Konzepten gibt es für die Beurteilung von Gussfehlern oder Gefügeheterogenitäten in Bezug auf das verbleibende Umformvermögen kaum veröffentlichte Informationen. Prinzipiell ist es zwar möglich empirische Schädigungsmodelle bzw. –indikatoren in modifizierter Form zu verwenden. Dabei kann eine bereits vorliegende Schädigung, sowie die Mehrachsigkeit des Spannungszustandes berücksichtigt werden. Meist fehlen aber auch genaue Angaben über die Belastungsvorgeschichte. Aus eigenen Erfahrungen [26] ist uns auch bekannt, dass die Streuungen der kritischen Schädigungswerte sehr groß und eine sichere Anwendung daher nicht gegeben sind. Eine qualitative Abschätzung bzw. Vergleichsrechnung für unterschiedliche Varianten ist jedoch durchaus sinnvoll möglich.

4.3 BEWERTUNG VON GEFÜGEHETEROGENITÄTEN IN ALTEN GUSSSTÜCKEN

Für eine sichere Beurteilung von Gefügeheterogenitäten in Stahlgusskomponenten bezüglich deren Auswirkungen auf das Bauteilverhalten gibt es zwar zahlreiche Einzeldarstellungen, es fehlt aber noch immer ein durchgängiges Konzept, wie man bspw. ältere Bauteile basierend auf den Ergebnissen der zFP bzw. ambulanten Metallographie hinsichtlich ihrer verminderten Tragfähigkeit bzw. Belastbarkeit bewerten könnte. Nachdem sehr viele ältere Anlagen (Wasserkraftmaschinen, kalorische Kraftwerke etc.) noch weiter betrieben werden sollten, ist eine verstärkte Beschäftigung mit dieser Frage dringend notwendig. Dazu zählen auch die quantitative Erkennung der Fehlergröße, sowie die reale Anwendung der bruchmechanischen Grundlagen.

5 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Gussgefüge und die Unterschiede zu den Knetwerkstoffen (Schmiede- oder Walzprodukte) werden zunehmend besser verstanden. Metallurgische Einflüsse und schädlich wirkende Elemente sind bekannt und werden durch geeignete Maßnahmen entschärft.

Gefügeheterogenitäten wirken sich weniger auf die Festigkeit, sondern vielmehr auf das Formänderungsvermögen und auf das Ermüdungsverhalten aus. Einige Fehler (Poren, Lunker, Einschlüsse) können als rißähnlich betrachtet werden und sind dadurch mit bruchmechanischen Ansätzen analysierbar. Lokale vorliegende Bruchzähigkeitswerte sind jedoch für die unterschiedlichen Gefügestände meist nicht quantitativ verfügbar.

Sehr wesentlich ist auch das Faktum, dass die Bedeutung der Stahlreinheit und der Fehlergröße mit zunehmendem Festigkeitsniveau zunimmt.

LITERATURNACHWEIS

- [1] H. Jacobi, H.; H.J. Ehrenberg, K. Wünnenberg: Stahl und Eisen 118, 87-94, 1998.
- [2] H. Presslinger, M. Mayr, E. Tragl, C. Bernhard: Steel Research 77, 107-115, 2006.
- [3] H. Jacobi: Steel Research 74, 667- 678, 2003.
- [4] H. Presslinger, S. Illie, A. Schiefermueller, A. Pissenberger, E. Parteder, C. Bernhard: ISIJ International 46, 1845-1851, 2006.
- [5] B. Mintz: ISIJ International 39, 833-855, 1999.
- [6] C. Bernhard, J. Reiter, H. Presslinger: Met. Mat. Trans. 39B, 885-895, 2008.
- [7] B. Weisgerber, K. Harste, W. Bleck: Steel Research 75, 686-692, 2004.
- [8] C. Bernhard, H. Hiebler, M.M. Wolf: Revue de Métallurgie, Cahiers d'Informations Techniques 97, 333-344, 2000.
- [9] K. Moerwald, A. Flick, C. Chimani, M. Stifinger: Steel Times International. 29, 37-40, 2005.
- [10] M.M. Wolf: Metallurgical Plant and Technology International 6, 46-59, 1983.
- [11] C.A. Muojekwu, D.Q. Jin, I.V. Samarasekera, J.K. Brimacombe: J.K. Brimacombe – Reflections and Perspectives, ISS-AIME, Warrendale, PA, 34-50, 2000.
- [12] G.Krauss: Solidification, segregation, and banding in Carbon and Alloy Steels, Met. And Materials Trans. 34B, No.6, 781-792, 2003.
- [13] S. Hasse: Guß- und Gefügefehler, Schiele und Schön, Berlin, 2.Aufl., 2003.
- [14] M.Blair, R.Monroe, C.Beckermann, R.Harding, K.Carlson, C.Monroe: Predicting the Occurrence and Effects of Defects in Castings, JOM May, S.29-34, 2005.
- [15] O.Mouquet: Einfluß von Gußfehlern auf die Dauerfestigkeit, Giesserei-Praxis, 8, S.293-300, 2004.
- [16] M.Hilbinger, J.Köpf, A.Lohmüller, M.Scharrer, M.Hartmann, R.F.Singer: Vermeidung von Gussfehlern und Prognose von Eigenschaften durch Modellierung, Konf. Numerische Simulation: Verarbeitungsprozesse und prozessgerechte Bauteilgestaltung, Bayreuth, Vortrag 2, 2./3.11.2004.

- [17] G.S.Cole: Inhomogeneities and their control via solidification, *Met. And Materials Trans.* 2B, No.2, 1971, 357-370.
- [18] L.Zhang, B.G.Thomas, X.Wang, K.Cai: Evaluation and control of steel cleanliness – review, 85th Steelmaking Conf. Proc., ISS-AIME, Warrendale, PA, 431-452, 2002.
- [19] P.A.Thornton: The influence of non-metallic inclusions on the mechanical properties of steel: A review, *J. Materials Science* 6, No.4, 347-356, 1971.
- [20] L.Zhang, B.G.Thomas: State of the Art in the Control of Inclusions during Steel Ingot Casting, *Met. and Materials Trans.* 37B, 733-761, 2006.
- [21] T.J. Douthit, C.J.V. Tyne : *J. Mat. Processing Technology* 160, 335–347, 2005.
- [22] G.Spur (Hrsg.) *Handbuch der Fertigungstechnik Bd. 4/2 Wärmebehandeln*, Hanser, 1987.
- [23] U.Zerbst, P.Langenberg: *Die industrielle Anwendung bruchmechanischer Konzepte vor dem Hintergrund internationaler Bewertungsvorschriften und Regelwerke*, 2001.
- [24] FKM Richtlinie, *Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile*, VDMA Verlag, 4.erweiterte Ausgabe, 2002.
- [25] C.Richter, T.Seeger, H.Amstutz: *Bruchmechanischer Festigkeitsnachweis für die Stahlgübelemente der Kronprinzenbrück in Berlin*, *Stahlbau* 70 Nr.4, S. 2521-257, 2001.
- [26] G.Rüf, C.Sommitsch, B.Buchmayr: *Int. Journal of Materials Research* 98, 1146-1155, 2007.