

D. Fuchs, D. Kohlschmid, T. Tobie, K. Stahl

On the Chemical Composition of Non-Metallic Inclusions in Ultra-Clean Gear Steels

Zur chemischen Zusammensetzung nicht-metallischer Einschlüsse in hochreinen Zahnradstählen

Abstract/Kurzfassung

Fisheye failures due to non-metallic inclusions can lead to the reduced endurance fatigue limit of case-hardened, shot-peened gears. Various approaches for preventing crack initiation at non-metallic inclusions are conceivable. As one approach, steel manufacturers have invested much effort in the steelmaking process to produce ultra-clean gear steels. Such ultra-clean gear steels were investigated in a gear research project. For each steel batch, different measures were taken during steel production to avoid or bind off non-metallic inclusions in order to reduce or even suppress the harmful effect of the non-metallic inclusions. However, the influence of the measures taken on the chemical composition of non-metallic inclusions in such ultra-clean gear steels is not investigated in the gear industry in detail so far. Therefore, in the framework of this publication, the chemical composition of non-metallic inclusions in ultra-clean gear steels is investigated. Furthermore, a comparison of the chemical analysis with the crack-initiating inclusions from the experimental investigations is performed.

Keywords: Non-metallic inclusion, chemical composition, ternary diagram, ultra-clean, gear steel, gear, fisheye failure

Bruchlinsenversagen (im Englischen: Fisheye failure) durch nicht-metallische Einschlüsse kann zur verminderten Dauerfestigkeit von einsatzgehärteten, kugelgestrahlten Zahnradern führen. Um die Rissbildung an nicht-metallischen Einschlüssen zu verhindern, sind verschiedene Ansätze denkbar. Ein Ansatz ist, dass Stahlhersteller viel Aufwand in den Stahlherstellungsprozess investieren, um hochreine Zahnradstähle herzustellen. Solche hochreinen Zahnradstähle wurden in einem Zahnrad-Forschungsprojekt untersucht. Für jede Stahlcharge wurden während der Stahlherstellung verschiedene Maßnahmen ergriffen, um nicht-metallische Einschlüsse zu vermeiden oder zu binden, um die schädliche Wirkung der nicht-metallischen Einschlüsse zu verringern oder sogar zu unterdrücken. Der Einfluss der getroffenen Maßnahmen auf die chemische Zusammensetzung der nicht-metallischen Einschlüsse in solch hochreinen Zahnradstählen wurde in der Getriebebranche bisher jedoch nicht im Detail untersucht. Im Rahmen dieser Veröffentlichung wird daher die chemische Zusammensetzung von nicht-metallischen Einschlüssen in hochreinen Zahnradstählen diskutiert. Außerdem wird ein Vergleich der chemischen Analyse mit den rissauslösenden Einschlüssen aus den experimentellen Untersuchungen durchgeführt.

Schlüsselwörter: Nicht-metallische Einschlüsse, chemische Zusammensetzung, Dreistoffdiagramm, hochreiner Zahnradstahl, Zahnrad, Bruchlinsenversagen, Fisheye failure

Authors/Autoren: M.Sc. Daniel Fuchs, B.Sc. Dominik Kohlschmid, Dr.-Ing. Thomas Tobie, Prof. Dr.-Ing. Karsten Stahl, Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebesysteme (FZG), Technische Universität München, Boltzmannstraße 15, 85748 Garching bei München, daniel.fuchs@tum.de (Corresponding author/Kontakt)

HOW TO CITE THIS ARTICLE: D. Fuchs et al.: On the Chemical Composition of Non-Metallic Inclusions in Ultra-Clean Gear Steels. HTM J. Heat Treatm. Mat. 77 (2022) 2, pp. 89-111, DOI:10.1515/htm-2022-1004

1 Introduction

Fisheye failures in case-hardened, shot-peened gears can lead to the reduced endurance fatigue limit of the gears. Non-metallic inclusions are usually present in the center of such fisheye failures.

1 Einleitung

Bruchlinsenversagen in einsatzgehärteten, kugelgestrahlten Zahnradern können zu einer reduzierten Dauerfestigkeit der Zahnradern führen. In der Regel sind nicht-metallische Einschlüsse in der

riched with gases up to the solubility limit. These gases can then rise in the melt. This can be supported by vacuum treatment before casting, to achieve a lower content of undesirable gases. Depending on the affinity of the alloy component to the gases, in combination they can form oxides or nitrides in the melt. The addition of silicon or aluminum are used for the deoxidation of the melt. As another, but more expensive option, is the use of an electroslag remelting (ESR) process [1, 2].

Typical representatives of crack-initiating non-metallic inclusions in common case-hardening steels for gear applications are aluminum oxides and manganese sulfides.

- **Manganese and sulfur:** Manganese improves hardenability and strength; sulfur, in combination with manganese, improves machinability by forming manganese sulfides (MnS) [1]. An advantage of manganese sulfides is that the steel becomes hot-workable due to the setting of the sulfur, thus avoiding red fracture caused by FeS. A disadvantage is that manganese sulfides are stretched linearly in the rolling direction during the rolling process, which can lead to undesirable toughness anisotropy [2].
- **Aluminum and oxygen:** A fine grain size can be achieved by a suitable aluminum and nitrogen ratio due to the formation of aluminum nitrides. However, aluminum can also form aluminum oxides. Oxygen is practically insoluble in iron and, like nitrogen, causes due to the formation of alumites the steel to become brittle. In case of case-hardened steels, aluminum oxides (Al_2O_3) can form from the aluminum and oxygen [2].
- **Niobium:** Niobium, like aluminum, can be used to achieve a fine grain. It also improves strength and notched impact strength [1]. However, niobium is an expensive alloying element.
- **Silicon:** Silicon is used as a deoxidizing agent in steel production and produces usually roundish, mostly hard and brittle silicates. During the rolling process these do not deform, but are arranged in rows [2]. Due to their size, SiO_2 particles are usually not critical inclusions.
- **Calcium:** The morphology of non-metallic inclusions can be influenced by the addition of calcium. The inclusions are globularly bound in a small degree [3, 4]. As a result, a better degree of cleanliness can be achieved. However, calcium is an expensive alloying element.

The alloying concept and the production route, e. g., secondary metallurgy, have an influence on the chemical composition of the non-metallic inclusions occurring in the steel. A post-sulfurization after vacuum treatment, which is often used, is for example problematic in order to maintain a good degree of cleanliness. The approach currently to produce ultra-clean gear steels used in practice is to reduce the number of non-metallic inclusions by stopping the oxidation, reducing alloying elements (such as sulfur or aluminum) or even substituting partially alloying elements with others (such as niobium partially instead of aluminum, see *Sharma et al.*

Schmelze wird dadurch bis zur Löslichkeitsgrenze mit Gasen angereichert. Diese Gase können dann in der Schmelze aufsteigen. Dies kann durch eine Vakuumbehandlung vor dem Gießen unterstützt werden, um einen geringeren Gehalt an unerwünschten Gasen zu erreichen. Je nach Affinität der Legierungsbestandteile zu den Gasen können diese in Kombination Oxide oder Nitride in der Schmelze bilden. Die Zugabe von Silizium oder Aluminium wird zur Desoxidation der Schmelze verwendet. Eine weitere, aber teurere Möglichkeit ist der Einsatz eines Elektroschlack-Umschmelzverfahrens (ESU) [1, 2].

Typische Vertreter von rissauslösenden nicht-metallischen Einschlüssen in gängigen Einsatzstählen für Zahnradanwendungen sind Aluminiumoxide und Mangansulfide.

- **Mangan und Schwefel:** Mangan verbessert die Härtebarkeit und Festigkeit; Schwefel verbessert in Verbindung mit Mangan die Bearbeitbarkeit durch die Bildung von Mangansulfiden (MnS) [1]. Ein Vorteil von Mangansulfiden ist, dass der Stahl durch das Abbinden des Schwefels warmverformbar wird, wodurch der durch FeS verursachte Rotbruch vermieden wird. Nachteilig ist, dass Mangansulfide beim Walzen linear in Walzrichtung gestreckt werden, was zu einer unerwünschten Anisotropie der Zähigkeit führen kann [2].
- **Aluminium und Sauerstoff:** Bei einem geeigneten Verhältnis von Aluminium und Stickstoff kann durch die Bildung von Aluminiumnitriden eine feine Korngröße erreicht werden. Aluminium kann jedoch auch Aluminiumoxide bilden. Sauerstoff ist in Eisen praktisch unlöslich und führt, wie Stickstoff, durch die Bildung von Aluminaten zur Versprödung des Stahls. Bei Einsatzstählen können sich aus dem Aluminium und Sauerstoff Aluminiumoxide (Al_2O_3) bilden [2].
- **Niob:** Wie Aluminium kann auch Niob verwendet werden, um ein feines Korn zu erzielen. Es verbessert auch die Festigkeit und Kerbschlagzähigkeit [1], ist jedoch ein teures Legierungselement.
- **Silizium:** Silizium wird bei der Stahlherstellung als Desoxidationsmittel eingesetzt und erzeugt üblicherweise rundliche, meist harte und spröde Silikate. Beim Walzen verformen sich diese nicht, sondern sind in Reihen angeordnet [2]. Aufgrund ihrer Größe sind SiO_2 -Partikel in der Regel keine kritischen Einschlüsse.
- **Calcium:** Die Morphologie der nicht-metallischen Einschlüsse kann durch den Zusatz von Calcium beeinflusst werden. Die Einschlüsse werden in geringem Maße kugelförmig gebunden [3, 4], sodass ein besserer Reinheitsgrad erreicht werden kann. Allerdings ist Calcium ein teures Legierungselement.

Das Legierungskonzept und der Produktionsweg, z. B. die Sekundärmetallurgie, haben Einfluss auf die chemische Zusammensetzung der im Stahl vorkommenden nicht-metallischen Einschlüsse. Eine Nachschwefelung nach der Vakuumbehandlung, die häufig eingesetzt wird, ist beispielsweise problematisch, um einen guten Reinheitsgrad zu erhalten. Der derzeit in der Praxis angewandte Ansatz zur Herstellung von hochreinen Zahnradstählen besteht darin, die Anzahl der nicht-metallischen Einschlüsse zu verringern, indem die Oxidation gestoppt, die Legierungselemente (wie Schwefel oder Aluminium) reduziert oder sogar durch an-

[5]). However, niobium is an expensive alloying element in comparison to aluminum.

3 Aim of the investigations

FVA research project 293 IV [6], which builds on the results and conclusions of various authors [7–18], comprises extensive experimental investigation of the tooth root bending strength of high-strength gears. These gears are case-hardened, shot-peened and are made from ultra-clean gear steels. The focus of the investigations is on the very high cycle fatigue range. It is investigated whether higher load carrying capacities can be achieved by gear steels with a better degree of cleanliness. By using such ultra-clean gear steels, a crack initiation below the surface at non-metallic inclusions (fisheye failure) should be prevented. The experiments are conducted on FZG back-to-back test rigs and Pulsator test rigs using gear sizes with a normal module of $m_n = 1.5$ mm and 5 mm. The first experimental results of three variants on the FZG back-to-back test rig are published in *Fuchs et al.* [19].

Against this background, ultra-clean gear steels were produced at different steel manufacturers. Different measures were taken during steel production to avoid or bind off non-metallic inclusions in order to reduce or even suppress the harmful effect of the non-metallic inclusions. However, the influence of the measures taken on the chemical composition of non-metallic inclusions in these steel batches is not known yet. Therefore, in the framework of this publication, the chemical composition of non-metallic inclusions in these ultra-clean gear steels is discussed. An analysis of the particles of each steel batch is done using a scanning electron microscope. Ternary diagrams are used to analyze the chemical composition of these particles in detail. Furthermore, the particle analysis is compared to microscopic degree of cleanliness determinations according to SEP 1571, Method K [20] and ISO 4967, Method A [21], since the ultrasonic immersion testing, investigating the macroscopic degree of cleanliness, showed no echoes in these ultra-clean gear steels [22]. In addition, the chemical elements in the base material and in the particles are compared. Conclusions are drawn, before the particle analysis is compared to the crack-initiating non-metallic inclusions from the experimental investigations in [6].

4 Steel batches, basic material documentation and SEM settings

Table 1 gives an overview of the steel batches, alloy systems, casting methods, steel bar diameters, reduction ratios and the features.

dere Legierungselemente teilweise ersetzt werden (z. B. Niob teilweise anstelle von Aluminium, s. *Sharma et al.* [5]). Niob ist jedoch im Vergleich zu Aluminium teuer.

3 Ziel der Untersuchungen

Das FVA-Forschungsvorhaben 293 IV [6], das auf den Ergebnissen und Schlussfolgerungen verschiedener Autoren [7–18] aufbaut, umfasst umfangreiche experimentelle Untersuchungen zur Zahnfußtragfähigkeit von hochtragfähigen Zahnradern. Diese Zahnräder sind einsatzgehärtet, kugelgestrahlt und werden aus hochreinen Zahnradstählen hergestellt. Der Schwerpunkt der Untersuchungen liegt im Bereich hoher Lastspielzahlen. Es wird untersucht, ob höhere Tragfähigkeiten durch Zahnradstähle mit einem besseren Reinheitsgrad erreicht werden können. Durch den Einsatz solcher hochreinen Zahnradstähle soll eine Rissinitiierung unterhalb der Oberfläche an nicht-metallischen Einschlüssen (Bruchlinsenversagen) verhindert werden. Die Versuche werden an FZG-Stirnradverspannungs- und Pulsator-Prüfständen mit Zahnradbaugrößen mit einem Normalmodul von $m_n = 1,5$ mm und 5 mm durchgeführt. Erste Versuchsergebnisse von drei Varianten auf dem FZG-Stirnradverspannungsprüfstand sind in *Fuchs et al.* [19] veröffentlicht.

Vor diesem Hintergrund wurden bei verschiedenen Stahlherstellern hochreine Zahnradstähle hergestellt. Bei der Stahlherstellung wurden verschiedene Maßnahmen zur Vermeidung bzw. Bindung von nicht-metallischen Einschlüssen ergriffen, um die schädigende Wirkung der nicht-metallischen Einschlüsse zu reduzieren oder gar zu unterdrücken. Der Einfluss der getroffenen Maßnahmen auf die chemische Zusammensetzung der nicht-metallischen Einschlüsse in diesen Stahlchargen ist jedoch noch nicht bekannt. Daher wird im Rahmen dieser Veröffentlichung die chemische Zusammensetzung der nicht-metallischen Einschlüsse in diesen hochreinen Zahnradstählen erörtert. Die Partikel der einzelnen Stahlchargen werden mithilfe eines Rasterelektronenmikroskops analysiert. Anhand von Dreistoffdiagrammen wird die chemische Zusammensetzung dieser Partikel im Detail analysiert. Darüber hinaus wird die Partikelanalyse mit mikroskopischen Reinheitsgradbestimmungen nach SEP 1571, Methode K [20] und ISO 4967, Methode A [21] verglichen, da die Ultraschalltauchprüfung, die den makroskopischen Reinheitsgrad untersucht, bei diesen hochreinen Zahnradstählen keine Echos zeigte [22]. Darüber hinaus werden die chemischen Elemente im Grundwerkstoff und in den Partikeln verglichen. Es werden Schlussfolgerungen gezogen, bevor die Partikelanalyse mit den rissauslösenden nicht-metallischen Einschlüssen aus den experimentellen Untersuchungen in [6] verglichen wird.

4 Stahlchargen, grundlegende Werkstoffdokumentation und REM-Einstellungen

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Stahlchargen, Legierungssysteme, Gießverfahren, Stabdurchmesser, Verformungsgrade

| Steel batch | Alloy system | Casting method | Steel bar diameter in mm | Reduction ratio | Feature |
|-------------|--------------|----------------|--------------------------|-----------------|---|
| OW1 | 20MnCr5 | Ingot | 125 | 8 : 1 | Reference steel batch; slight calcium treatment |
| OW2 | | Ingot | 70 | 50 : 1 | Calcium treatment with additional recrystallization annealing (vacuum degassed) |
| OW4 | | Continuous | 100 | 8 : 1 | Low sulfur (vacuum degassed) |
| OW3 | 18CrNiMo7-6 | Continuous | 140 | 8 : 1 | Rolling/forging process (vacuum degassed) |
| OW5 | | Ingot | 140 | 27.3 : 1 | Low sulfur and aluminum; niobium alloyed (vacuum degassed) |
| OW7 | 20NiMo9-7 | Ingot | 130 | 12 : 1 | Calcium treatment with additional recrystallization annealing (vacuum degassed) |
| S9 | 18NiCr5-4 | Ingot | 110 | 17 : 1 | |

Table 1. Overview of the investigated test steel batches and their characteristics

Tabelle 1. Übersicht über die untersuchten Prüf-Stahlchargen und ihre Eigenschaften

| Steel batch | Alloy system | Chemical composition in weight-% | | | | | | | | | |
|-------------|---------------|----------------------------------|------|------|------|------|-------|-------|------|-------|------|
| | | C | Mn | Cr | Ni | Mo | S | Al | Cu | P | Si |
| OW1 | EN20MnCr5 | 0.20 | 1.17 | 1.15 | 0.12 | 0.05 | 0.019 | 0.026 | 0.18 | 0.018 | 0.23 |
| OW2 | | 0.21 | 1.16 | 1.17 | 0.15 | 0.06 | 0.001 | 0.114 | 0.17 | 0.007 | 0.14 |
| OW4 | | 0.21 | 1.31 | 1.25 | 0.16 | 0.02 | 0.006 | 0.031 | 0.12 | 0.010 | 0.17 |
| OW3 | EN18CrNiMo7-6 | 0.20 | 0.54 | 1.74 | 1.56 | 0.29 | 0.011 | 0.025 | 0.20 | 0.011 | 0.26 |
| OW5 | | 0.19 | 0.54 | 1.65 | 1.42 | 0.27 | 0.001 | 0.009 | 0.10 | 0.007 | 0.27 |
| OW7 | EN20NiMo9-7 | 0.20 | 0.23 | 0.38 | 2.24 | 0.67 | 0.001 | 0.082 | 0.16 | 0.004 | 0.08 |
| S9 | EN18NiCr5-4 | 0.18 | 0.78 | 1.15 | 1.41 | 0.09 | 0.001 | 0.033 | 0.13 | 0.008 | 0.31 |
| 20MnCr5 | max. | 0.22 | 1.40 | 1.30 | – | – | 0.035 | – | – | 0.025 | 0.40 |
| | min. | 0.17 | 1.10 | 1.00 | – | – | – | – | – | – | – |
| 18CrNiMo7-6 | max. | 0.21 | 0.90 | 1.80 | 1.70 | 0.35 | 0.035 | – | – | 0.025 | 0.40 |
| | min. | 0.15 | 0.50 | 1.50 | 1.40 | 0.25 | – | – | – | – | – |
| 20NiMo9-7 | max. | 0.21 | 0.30 | 0.40 | 2.35 | 0.70 | 0.002 | – | – | 0.025 | 0.10 |
| | min. | 0.18 | 0.22 | 0.35 | 2.25 | 0.67 | – | – | – | – | – |
| 18NiCr5-4 | max. | 0.21 | 0.90 | 1.20 | 1.50 | – | 0.035 | – | – | 0.025 | 0.40 |
| | min. | 0.16 | 0.60 | 0.90 | 1.20 | – | – | – | – | – | – |

Table 2. Chemical analysis of ultra-clean steel batches and limits according to DIN EN ISO 683, Part 3 [23] and for steel batch EN20NiMo9-7 according to the material inspection document of the steel manufacturer

Tabelle 2. Chemische Analyse der hochreinen Stahlchargen und Grenzwerte nach DIN EN ISO 683, Teil 3 [23] und für die Stahlcharge EN20NiMo9-7 nach dem Werkstoffprüfzeugnis des Stahlherstellers

| | MnCr-alloyed | | | CrNiMo-alloyed | | NiMo-alloyed | NiCr-alloyed |
|---------------------------|--------------|-----|-----|----------------|-----|--------------|--------------|
| | OW1 | OW2 | OW4 | OW3 | OW5 | OW7 | S9 |
| O _{total} in ppm | 14 | 10 | 13 | 14 | 18 | 6 | 9 |

Table 3. Total oxygen content of the steel batches

Tabelle 3. Gesamtsauerstoffgehalt der Stahlchargen

Steel batch OW1 serves as reference and shows a common degree of cleanliness for gear steels. All other steel batches are vacuum degassed and should therefore show a better degree of cleanliness. For some steel batches, calcium treatment with additional recrystallization annealing was performed. Steel batch OW4 has a low sulfur content, whereas steel batch OW5 has a low sulfur and aluminum content and is niobium alloyed. Niobium was alloyed in addition to the lower content of aluminum in steel batch OW5 to ensure fine grain. Steel batch OW3 was produced, among other things, using a rolling/forging process. Steel batches OW3 and OW4 are from continuous casting, whereas all other steel batches are from ingot casting. The diameters of the steel bars are between 70 and 140 mm, and the reduction ratios are between 8 : 1 and 50 : 1. For reasons of confidentiality and anonymity, further information about the process routes in detail is not available.

The chemical analysis and the oxygen content are listed in Table 2 and Table 3. All steel batches are within the limits according to DIN EN ISO 683, Part 3 [23]. Furthermore, all steel batches show oxygen contents below the maximum specification of 25 ppm according to ISO 6336, Part 5 [24]; see Table 3. Figure 1 shows the stacked bar diagram of the degree of cleanliness according to ISO 4967, Method A [21] of the steel batches investigated. The lower the value, the higher the degree of cleanliness. Steel batches OW2, S9 and OW7 show the lowest cleanness index. All steel batches clearly fulfill the requirements for material quality ME based on ISO 4967, Method A [21], according to Part 5 of ISO 6336 [24] for case-hardened wrought steels.

und die Merkmale. Die Stahlcharge OW1 dient als Referenz und zeigt einen für Zahnradstähle üblichen Reinheitsgrad. Alle anderen Stahlchargen sind vakuumentgast und sollten daher einen besseren Reinheitsgrad aufweisen. Für einige Stahlchargen wurde eine Calciumbehandlung mit zusätzlichem Rekristallisationsglühen durchgeführt. Die Stahlcharge OW4 hat einen niedrigen Schwefelgehalt, während die Stahlcharge OW5 einen niedrigen Schwefel- und Aluminiumgehalt hat und mit Niob legiert ist. Bei der Stahlcharge OW5 wurde zusätzlich zum geringeren Aluminiumgehalt Niob zulegiert, um ein feines Korn zu gewährleisten. Die Stahlcharge OW3 wurde unter anderem durch ein Walz-/Schmiedeverfahren hergestellt. Die Stahlchargen OW3 und OW4 stammen aus dem Strangguss, alle anderen Stahlchargen aus dem Blockguss. Die Durchmesser des Stangenmaterials liegt zwischen 70 und 140 mm, die Verformungsgrade zwischen 8 : 1 und 50 : 1. Aus Gründen der Vertraulichkeit und Anonymität sind weitere Informationen über die Prozesswege im Detail nicht verfügbar.

Die chemische Analyse und der Sauerstoffgehalt sind in Tabelle 2 und Tabelle 3 aufgeführt. Alle Stahlchargen liegen innerhalb der Grenzwerte nach DIN EN ISO 683, Teil 3 [23]. Darüber hinaus weisen alle Stahlchargen Sauerstoffgehalte auf, die unterhalb der maximalen Spezifikation von 25 ppm nach ISO 6336, Teil 5 [24] liegen; siehe Tabelle 3. Bild 1 zeigt das gestapelte Balkendiagramm des Reinheitsgrades nach ISO 4967, Methode A [21] der untersuchten Stahlchargen. Je niedriger der Wert, desto höher der Reinheitsgrad. Die Stahlchargen OW2, S9 und OW7 weisen den niedrigsten Reinheitsgrad auf. Alle Stahlchargen erfüllen eindeutig die Anforderungen der Materialqualität ME nach ISO 4967, Methode A [21], gemäß Teil 5 der ISO 6336 [24] für einsatzgehärtete Einsatzstähle.

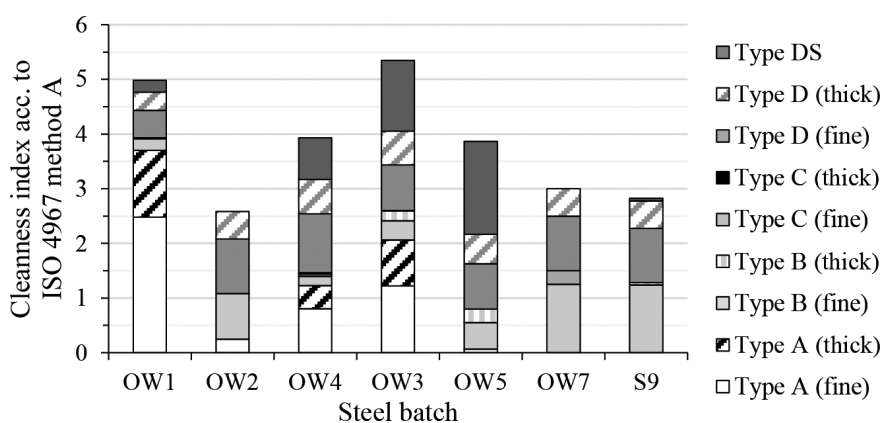


Fig. 1. Stacked bar diagram of the degree of cleanliness according to ISO 4967, Method A [21] of the steel batches investigated

Bild 1. Gestapeltes Balkendiagramm des Reinheitsgrades nach ISO 4967, Methode A [21] der untersuchten Stahlchargen

| Unit | Setting |
|--------------------------|--|
| Cathode | Field emitter |
| Voltage | 15 kV |
| Detector | SE (secondary electrons) and BSE (backscatter electrons) |
| EDX | Oxford X-MAX (80 × 80) |
| Process time | 5 μs |
| Dead time | 50 % |
| Count limit for analysis | 2,000,000 |

Table 4. Settings used of the scanning electron microscope for the particle analysis

Tabelle 4. Einstellungen des Rasterelektronenmikroskops für die Partikelanalyse

| Inclusion type | Oxides | Sulfides |
|----------------|-------------|-------------|
| Oxygen (O) | 10 to 100 % | – |
| Iron (Fe) | < 50 % | |
| Sulfur (S) | < 20 % | 20 to 100 % |

Table 5. Classification specifications for the particle analyses

Tabelle 5. Klassifizierungsspezifikationen für die Partikelanalysen

The settings used of the scanning electron microscope for the particle analysis are given in Table 4. Table 5 shows the classification specifications for the particle analysis.

5 Systematic determination of the chemical composition of non-metallic inclusions in ultra-clean gear steels

The chemical composition of the non-metallic inclusions was determined using a scanning electron microscope. In order to consider only non-metallic inclusions, no points containing more than 50 % iron are considered in the investigations in the following (see Table 5). Furthermore, the specific oxygen content of the particles is not taken completely into account for the comparisons, since the samples examined are subject to a certain degree of oxidation by atmospheric oxygen and the measurement is affected for this reason.

Three elements are normalized to 100 % and transferred to the ternary diagram. Table 6 gives an overview of the area investigated, the total number of particles characterized and the particle density of each steel batch for the ternary diagrams.

5.1 MnCr-alloyed

5.1.1 Steel batch OW1

Table 7 gives an overview of the number of particles with their chemical elements and their chemical content in weight-% of steel

Die für die Partikelanalyse verwendeten Einstellungen des Rasterelektronenmikroskops sind in Tabelle 4 angegeben. Tabelle 5 zeigt die Klassifizierungsspezifikationen für die Partikelanalyse.

5 Systematische Bestimmung der chemischen Zusammensetzung nicht-metallischer Einschlüsse in hochreinen Zahnradstählen

Die chemische Zusammensetzung der nicht-metallischen Einschlüsse wurde mithilfe eines Rasterelektronenmikroskops bestimmt. Um nur nicht-metallische Einschlüsse zu berücksichtigen, werden in den folgenden Untersuchungen keine Punkte mit mehr als 50 % Eisenanteil berücksichtigt (siehe Tabelle 5). Des Weiteren wird der spezifische Sauerstoffgehalt der Partikel bei den Vergleichen nicht vollständig berücksichtigt, da die untersuchten Proben einer gewissen Oxidation durch Luftsauerstoff unterliegen und die Messung aus diesem Grund beeinträchtigt wird.

Drei Elemente werden auf 100 % normiert und in das Dreistoffdiagramm übertragen. Tabelle 6 gibt einen Überblick über den untersuchten Bereich, die Gesamtzahl der charakterisierten Partikel und die Partikeldichte jeder Stahlcharge für die Dreistoffdiagramme.

5.1 MnCr-legiert

5.1.1 Stahlcharge OW1

Tabelle 7 gibt einen Überblick über die Anzahl der Partikel mit ihren chemischen Elementen und ihrem chemischen Gehalt in Massepro-

| Steel batch | Area investigated in mm ² | Number of particles characterized | Particle density (particles per mm ²) |
|-------------|--------------------------------------|-----------------------------------|---|
| OW1 | 1023.0 | 2039 | 1.99 |
| OW2 | 230.1 | 69 | 0.30 |
| OW4 | 172.5 | 1310 | 7.59 |
| OW3 | 278.3 | 662 | 2.38 |
| OW5 | 228.5 | 720 | 3.15 |
| OW7 | 241.1 | 109 | 0.45 |
| S9 | 258.5 | 12 | 0.05 |

Table 6. Overview of total number of particles characterized of each steel batch for the ternary diagrams

Tabelle 6. Übersicht über die Gesamtzahl der charakterisierten Partikel jeder Stahlcharge für die Dreistoffdiagramme

| Chemical element | Mn | S | Al | Ca | Mg | Cr | |
|------------------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| Number of particles | 1741 | 1707 | 2039 | 168 | 1704 | 340 | |
| Chemical content in weight-% | max. | 37.95 | 19.99 | 43.43 | 10.99 | 11.11 | 1.71 |
| | min. | 0.89 | 0.39 | 7.33 | 0.39 | 0.44 | 0.63 |

Table 7. Number of particles with the specified chemical elements of steel batch OW1

Tabelle 7. Partikelanzahl mit den angegebenen chemischen Elementen der Stahlcharge OW1

batch OW1. All of the particles investigated show aluminum (compare the total number of particles in Table 6). Most of the particles show manganese, sulfur and magnesium. Chromium and calcium are only present in a small number of particles.

zent der Stahlcharge OW1. Alle untersuchten Partikel weisen Aluminium auf (vgl. die Gesamtzahl der Partikel in Tabelle 6). Die meisten der Partikel enthalten Mangan, Schwefel und Magnesium. Chrom und Calcium sind nur in einer kleinen Anzahl von Partikeln vorhanden.

Figure 2 shows the ternary diagrams of steel batch OW1. In Figure 2a the ternary diagram Ca-Mn-S is shown. It can be seen that

Bild 2 zeigt die Dreistoffdiagramme der Stahlcharge OW1. In Bild 2a ist das Dreistoffdiagramm Ca-Mn-S dargestellt. Es ist zu

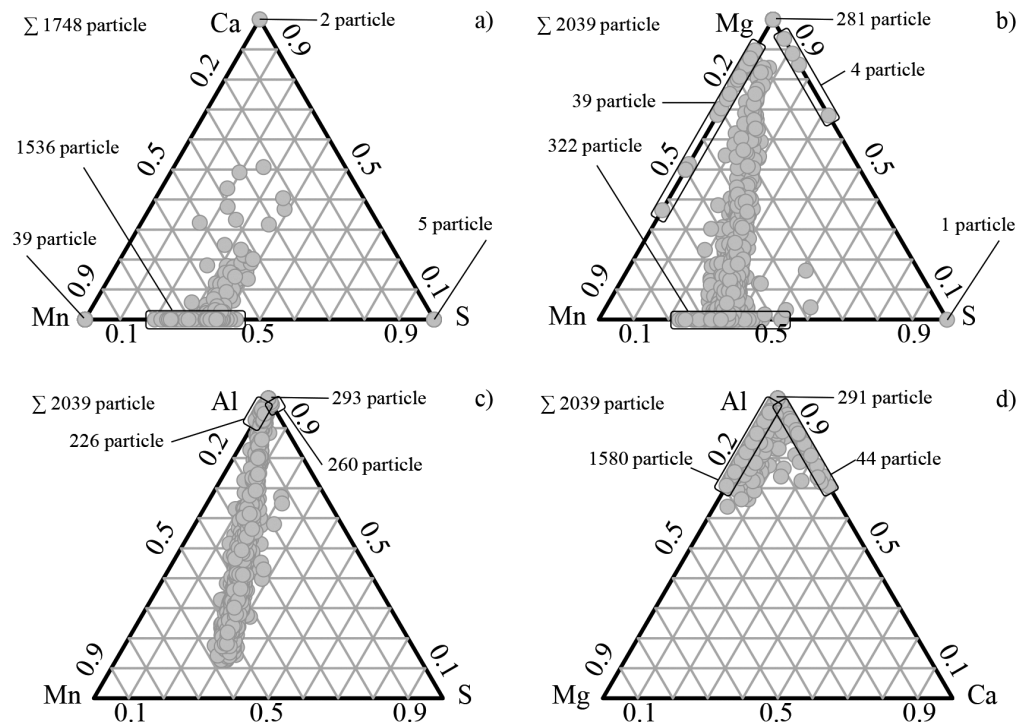


Fig. 2. Ternary diagrams of steel batch OW1 – a) Ca-Mn-S, b) Mg-Mn-S, c) Al-Mn-S and d) Al-Mg-Ca

Bild 2. Dreistoffdiagramm der Stahlcharge OW1 – a) Ca-Mn-S, b) Mg-Mn-S, c) Al-Mn-S und d) Al-Mg-Ca

most of the non-metallic inclusions do not show a calcium content, only 10 % have a calcium content. However, it can also be seen that only 1748 of a total number of 2039 particles are listed in this diagram. This indicates that not all particles can be represented using this diagram. Therefore, in the next ternary diagram Mg-Mn-S, magnesium is considered (see Figure 2b). This diagram shows all 2039 particles and magnesium is present in most of the particles. However, approximately 70 % of the particles are not on the axis. That points to another chemical element. In the ternary diagram Al-Mn-S in Figure 2c, the particles are investigated with respect to an aluminum content. All of the particles show an aluminum content in varying degrees. However, it can also be seen that the majority of the particles are still not on an axis. In Figure 2d, the ternary diagram Al-Mg-Ca is shown. Most of the particles are on the Al-Mg axis in this figure. Consequently, the most common particle type in steel batch OW1 consists of manganese, sulfur, aluminum and magnesium in different proportions.

5.1.2 Steel batch OW2

Steel batch OW2 shows only 69 particles in total (compare Table 6). Table 8 gives an overview of the number of particles with their chemical elements and their chemical content in weight-%. All of the particles investigated show magnesium. Most of the particles show calcium, sulfur, aluminum, and only a few contain manganese.

The chemical elements magnesium, calcium and sulfur are the most prominent in Table 8. Therefore, Figure 3a shows the ternary diagram Ca-Mg-S. It can be seen that, except four particles, all particles consist of these three chemical elements. Figure 3b compares the chemical elements calcium, magnesium and aluminum. Two of the four particles of subfigure (a) show a small aluminum content. However, 12 particles do not show any aluminum content,

erkennen, dass die meisten nicht-metallischen Einschlüsse keinen Calciumgehalt aufweisen, nur 10 % haben einen Calciumgehalt. Es ist jedoch auch zu erkennen, dass nur 1748 von insgesamt 2039 Partikeln in diesem Diagramm aufgeführt sind. Dies zeigt, dass nicht alle Partikel mit diesem Diagramm dargestellt werden können. Daher wird im nächsten Dreistoffdiagramm Mg-Mn-S das Magnesium betrachtet (siehe Bild 2b). Dieses Diagramm zeigt alle 2039 Partikel und Magnesium ist in den meisten Partikeln enthalten. Allerdings befinden sich etwa 70 % der Partikel nicht auf der Achse. Das deutet auf ein anderes chemisches Element hin. In dem Dreistoffdiagramm Al-Mn-S in Bild 2c werden die Partikel auf ihren Aluminiumgehalt hin untersucht. Alle Partikel weisen einen Aluminiumgehalt in unterschiedlichem Ausmaß auf. Es ist jedoch auch zu erkennen, dass die Mehrzahl der Partikel noch nicht auf einer Achse liegt. In Bild 2d ist das Dreistoffdiagramm Al-Mg-Ca dargestellt. In dieser Bild liegen die meisten Teilchen auf der Al-Mg-Achse. Folglich besteht der häufigste Partikeltyp in der Stahlcharge OW1 aus Mangan, Schwefel, Aluminium und Magnesium in unterschiedlichen Anteilen.

5.1.2 Stahlcharge OW2

Die Stahlcharge OW2 enthält insgesamt nur 69 Partikel (vgl. Tabelle 6). Tabelle 8 gibt einen Überblick über die Anzahl der Partikel mit ihren chemischen Elementen und ihrem chemischen Gehalt in Masse-%. Alle untersuchten Partikel weisen Magnesium auf. Die meisten Partikel enthalten Calcium, Schwefel, Aluminium und nur wenige enthalten Mangan.

Die chemischen Elemente Magnesium, Calcium und Schwefel sind in Tabelle 8 am stärksten vertreten. Daher zeigt Bild 3a das Dreistoffdiagramm Ca-Mg-S. Es ist zu erkennen, dass mit Ausnahme von vier Partikeln alle Partikel aus diesen drei chemischen Elementen bestehen. Bild 3b vergleicht die chemischen Elemente Calcium, Magnesium und Aluminium. Zwei der vier Partikel in Unterabbildung (a) weisen einen geringen Aluminiumgehalt auf.

| Chemical element | Mn | S | Al | Ca | Mg | Cr | Ti | Si | |
|------------------------------|------|------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|
| Number of particles | 9 | 64 | 55 | 65 | 69 | 37 | 16 | 10 | |
| Chemical content in weight-% | max. | 1.30 | 19.88 | 13.29 | 30.94 | 37.42 | 1.89 | 3.60 | 2.48 |
| | min. | 0.89 | 0.45 | 0.35 | 0.88 | 0.71 | 0.80 | 0.53 | 0.30 |

Table 8. Number of particles with the specified chemical elements of steel batch OW2

Tabelle 8. Partikelanzahl mit den angegebenen chemischen Elementen der Stahlcharge OW2

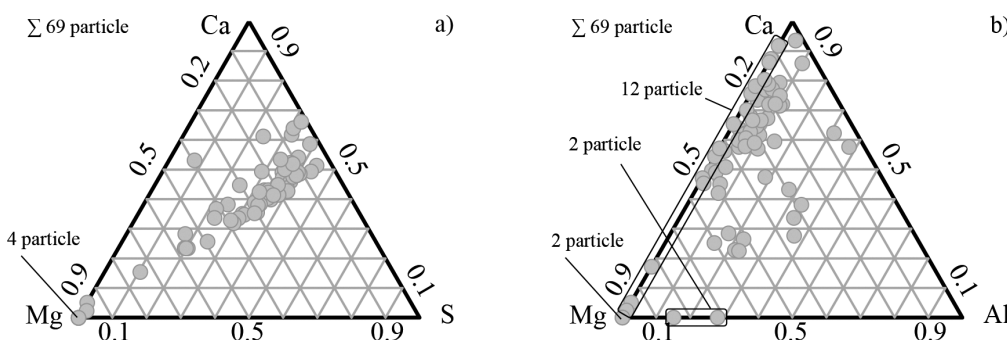


Fig. 3. Ternary diagrams of steel batch OW2 – a) Ca-Mg-S and b) Ca-Mg-Al

Bild 3. Dreistoffdiagramm der Stahlcharge OW2 – a) Ca-Mg-S und b) Ca-Mg-Al

Table 9. Number of particles with the specified chemical elements of steel batch OW4

| Chemical element | Mn | S | Al | Ca | Mg | Cr | |
|------------------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| Number of particles | 1308 | 1309 | 1310 | 1307 | 1309 | 508 | |
| Chemical content in weight-% | max. | 30.27 | 19.80 | 28.12 | 17.06 | 12.07 | 1.49 |
| | min. | 1.19 | 1.13 | 5.16 | 0.98 | 0.83 | 0.59 |

Tabelle 9. Partikelanzahl mit den angegebenen chemischen Elementen der Stahlcharge OW4

whereas the other particles show an aluminum content up to approximately 38 %. Consequently, the most common particle type in steel batch OW2 consists of magnesium, calcium, sulfur, and aluminum in different proportions.

Allerdings weisen 12 Partikel keinen Aluminiumgehalt auf, während die anderen Partikel einen Aluminiumgehalt von bis zu etwa 38 % aufweisen. Folglich besteht der häufigste Partikeltyp in der Stahlcharge OW2 aus Magnesium, Calcium, Schwefel und Aluminium in unterschiedlichen Anteilen.

5.1.3 Steel batch OW4

5.1.3 Stahlcharge OW4

Steel batch OW4 shows 1310 particles in total (compare Table 6). Table 9 gives an overview of the number of particles with their chemical elements and their chemical content in weight-%. All of the particles investigated show aluminum. Almost all particles show manganese, sulfur, calcium and magnesium. A few particles show a small chromium content.

Die Stahlcharge OW4 enthält insgesamt 1310 Partikel (vgl. Tabelle 6). Tabelle 9 gibt einen Überblick über die Anzahl der Partikel mit ihren chemischen Elementen und ihrem chemischen Gehalt in Masse-%. Alle untersuchten Partikel weisen Aluminium auf. Fast alle Partikel enthalten Mangan, Schwefel, Calcium und Magnesium. Einige wenige weisen einen geringen Chromgehalt auf.

Figure 4 shows the ternary diagrams of steel batch OW4. All of the particles content manganese, sulfur, aluminum, calcium and magnesium in different proportions. The majority of the particles content calcium up to 50 % and magnesium up to 70 % (see Figure 4a and b). All particles show a minimum content of 10 % aluminum (see Figure 4c). Figure 4d confirms that magnesium and calcium are present in almost every particle.

Bild 4 zeigt die Dreistoffdiagramme der Stahlcharge OW4. Alle Partikel enthalten Mangan, Schwefel, Aluminium, Calcium und Magnesium in unterschiedlichen Anteilen. Die Mehrheit enthält bis zu 50 % Calcium und bis zu 70 % Magnesium (siehe Bild 4a und b). Alle Partikel weisen einen Mindestgehalt von 10 % Aluminium auf (siehe Bild 4c). Bild 4d bestätigt, dass Magnesium und Calcium in fast allen Partikeln vorhanden sind.

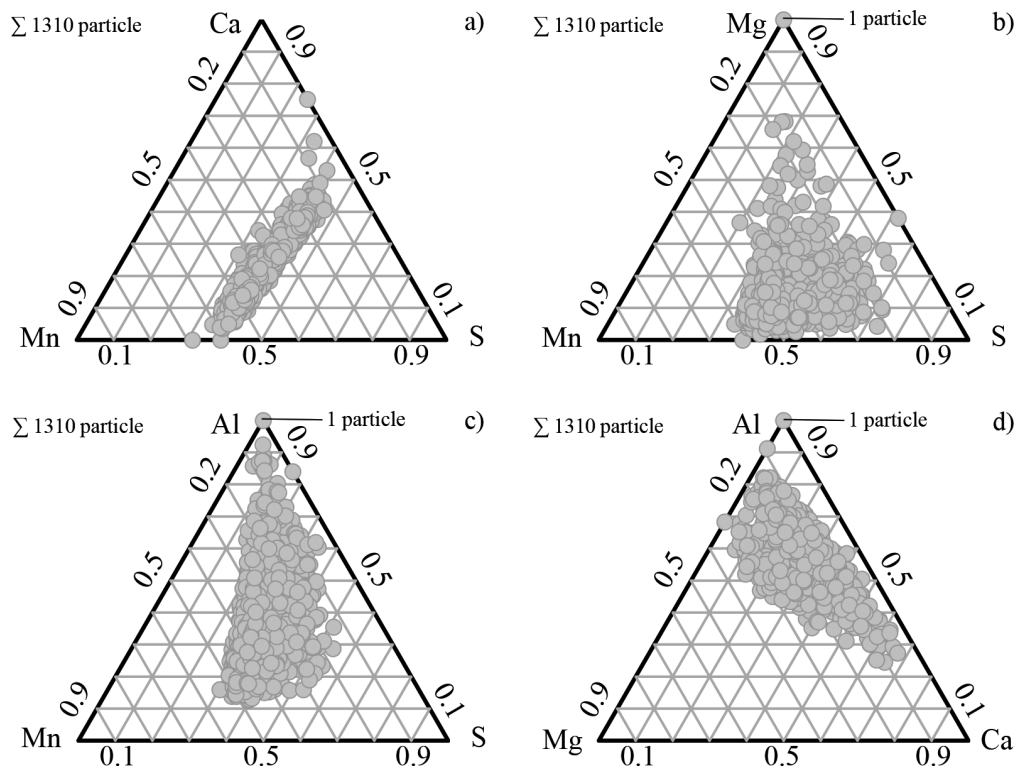


Fig. 4. Ternary diagrams of steel batch OW4 – a) Ca-Mn-S, b) Mg-Mn-S, c) Al-Mn-S and d) Al-Mg-Ca

Bild 4. Dreistoffdiagramm der Stahlcharge OW4 – a) Ca-Mn-S, b) Mg-Mn-S, c) Al-Mn-S und d) Al-Mg-Ca

| Chemical element | Mn | S | Al | Ca | Mg | Cr | |
|------------------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| Number of particles | 559 | 565 | 661 | 516 | 662 | 539 | |
| Chemical content in weight-% | max. | 29.69 | 19.98 | 32.11 | 18.23 | 33.50 | 2.32 |
| | min. | 0.75 | 0.37 | 5.84 | 0.51 | 0.67 | 0.58 |

Table 10. Number of particles with the specified chemical elements of steel batch OW3

Tabelle 10. Partikelanzahl mit den angegebenen chemischen Elementen der Stahlcharge OW3

5.2 CrNiMo-alloyed

5.2.1 Steel batch OW3

Steel batch OW3 shows 662 particles in total (compare Table 6). Table 10 gives an overview of the number of particles with their chemical element and their chemical content in weight-%. All of the particles investigated show magnesium and, except one particle, aluminum, as well.

The ternary diagram in Figure 5a represents 485 out of the 662 particles. These particles contain manganese, sulfur and most of them also calcium. All 662 particles are present in Figure 5b. A few particles do not show any manganese or sulfur, only magnesium. However, the other particles are a mixture of manganese, sulfur and magnesium. Figure 5c and d show that in almost all particles aluminum is also present.

5.2.2 Steel batch OW5

Steel batch OW5 shows 720 particles in total (compare Table 6). Table 11 gives an overview of the number of particles with their

5.2 CrNiMo-legiert

5.2.1 Stahlcharge OW3

Die Stahlcharge OW3 enthält insgesamt 662 Partikel (vgl. Tabelle 6). Tabelle 10 gibt einen Überblick über die Anzahl der Partikel mit ihrem chemischen Element und ihrem chemischen Gehalt in Masse-%. Alle untersuchten Partikel enthalten Magnesium und bis auf ein Partikel auch Aluminium.

Das Dreistoffdiagramm in Bild 5a stellt 485 der 662 Partikel dar. Diese Partikel enthalten Mangan, Schwefel und in den meisten Fällen auch Calcium. Alle 662 Partikel sind in Bild 5b zu sehen. Einige wenige enthalten kein Mangan oder Schwefel, sondern nur Magnesium. Die anderen Partikel sind jedoch eine Mischung aus Mangan, Schwefel und Magnesium. Bild 5c und d zeigen, dass in fast allen auch Aluminium vorhanden ist.

5.2.2 Stahlcharge OW5

Die Stahlcharge OW5 enthält insgesamt 720 Partikel (vgl. Tabelle 6). Tabelle 11 gibt einen Überblick über die Anzahl der Partikel

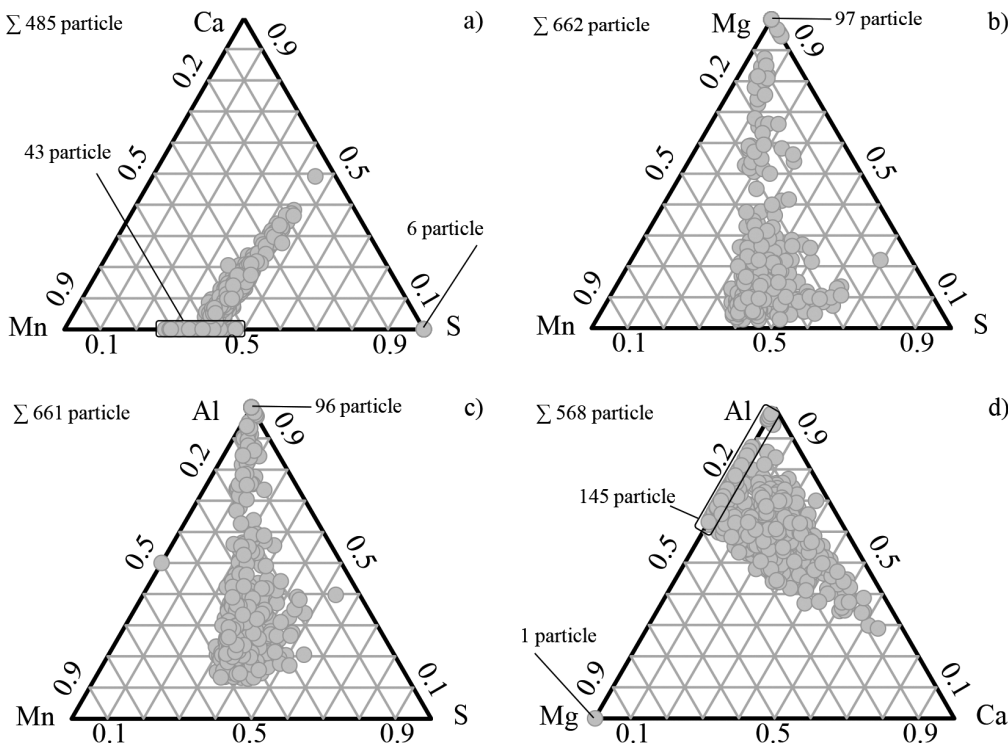


Fig. 5. Ternary diagrams of steel batch OW3 – a) Ca-Mn-S, b) Mg-Mn-S, c) Al-Mn-S and d) Al-Mg-Ca

Bild 5. Dreistoffdiagramm der Stahlcharge OW3 – a) Ca-Mn-S, b) Mg-Mn-S, c) Al-Mn-S und d) Al-Mg-Ca

Table 11. Number of particles with the specified chemical elements of steel batch OW5

| Chemical element | Mn | S | Al | Ca | Mg | Cr | Si | Nb | |
|------------------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|-------|
| Number of particles | 644 | 709 | 720 | 656 | 716 | 489 | 459 | 80 | |
| Chemical content in weight-% | max. | 26.35 | 19.52 | 30.22 | 29.94 | 12.91 | 2.33 | 6.74 | 24.13 |
| | min. | 0.79 | 0.48 | 4.14 | 0.46 | 0.44 | 0.59 | 0.31 | 1.08 |

Tabelle 11. Partikelanzahl mit den angegebenen chemischen Elementen der Stahlcharge OW5

chemical elements and their chemical content in weight-%. All of the particles investigated show aluminum. Almost all particles show also magnesium and sulfur. Manganese and calcium are present in most particles. Chromium and silicon are present in small amounts in most of the particles, as well. Niobium was intentionally alloyed in steel batch OW5. In 80 particles, therefore also niobium is present.

Figure 6 shows the ternary diagrams of steel batch OW5. It can be seen in Figure 6a, b and c that almost all of the particles, which contain manganese and sulfur, have a content of calcium, magnesium and aluminum. Figure 6d shows the different proportions of

mit ihren chemischen Elementen und ihrem chemischen Gehalt in Masse-%. Alle untersuchten Partikel weisen Aluminium auf. Fast alle weisen auch Magnesium und Schwefel auf. Mangan und Calcium sind in den meisten Partikeln vorhanden. Auch Chrom und Silizium sind in geringen Mengen in den meisten vorhanden. Niob wurde in der Stahlcharge OW5 absichtlich zulegiert. In 80 Partikeln ist daher auch Niob enthalten.

Bild 6 zeigt die Dreistoffdiagramme der Stahlcharge OW5. In Bild 6a, b und c ist zu erkennen, dass fast alle Partikel, die Mangan und Schwefel enthalten, einen Gehalt an Calcium, Magnesium und Aluminium aufweisen. Bild 6d zeigt die unterschiedlichen

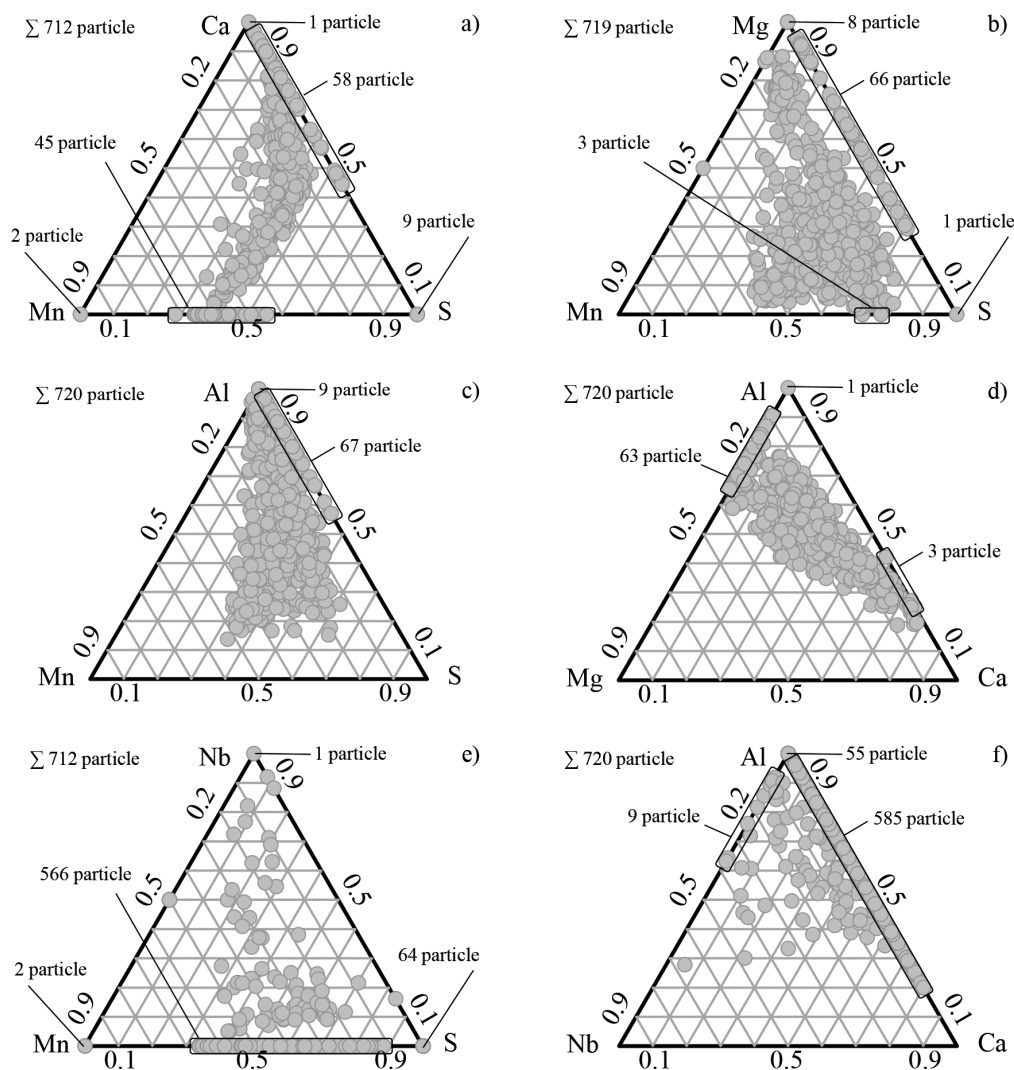


Fig. 6. Ternary diagrams of steel batch OW5 – a) Ca-Mn-S, b) Mg-Mn-S, c) Al-Mn-S, d) Al-Mg-Ca, e) Nb-Mn-S and f) Al-Nb-Ca

Bild 6. Dreistoffdiagramm der Stahlcharge OW5 – a) Ca-Mn-S, b) Mg-Mn-S, c) Al-Mn-S, d) Al-Mg-Ca, e) Nb-Mn-S und f) Al-Nb-Ca

| Chemical element | Mn | S | Al | Ca | Mg | Ti | Ni | |
|------------------------------|------|-----|-------|------|-------|-------|-------|------|
| Number of particles | 0 | 104 | 2 | 109 | 22 | 10 | 6 | |
| Chemical content in weight-% | max. | – | 19.75 | 0.80 | 33.56 | 37.94 | 19.66 | 2.13 |
| | min. | – | 0.62 | 0.39 | 0.86 | 0.52 | 1.38 | 0.91 |

Table 12. Number of particles with the specified chemical elements of steel batch OW7

Tabelle 12. Partikelanzahl mit den angegebenen chemischen Elementen der Stahlcharge OW7

aluminum, magnesium and calcium. Steel batch OW5 was intentionally alloyed with niobium. Figure 6e and f compare the particles which contain niobium with the rest of the particles. A small number of 80 particles contains also niobium in different proportions.

Anteile von Aluminium, Magnesium und Calcium. Die Stahlcharge OW5 wurde bewusst mit Niob legiert. In Bild 6e und f werden die Partikel, die Niob enthalten, mit den restlichen Partikel verglichen. Eine kleine Anzahl von 80 Partikeln enthält auch Niob in unterschiedlichen Anteilen.

5.3 Special alloyed gear steels

5.3 Sonderlegierte Zahnradstähle

5.3.1 Steel batch OW7

5.3.1 Stahlcharge OW7

Steel batch OW7 shows 109 particles in total (compare Table 6). Table 12 gives an overview of the number of particles with their chemical elements and their chemical content in weight-%. All of the particles investigated show calcium. Almost all particles show sulfur. Aluminum is present in only two particles in a small amount and manganese is present in only 22 particles. Titanium and nickel are also present in a few particles. Figure 7 shows the Ca-Mg-S and Ca-Ti-S ternary diagram of steel batch OW7. It is confirmed that most of the inclusions are composed of calcium and sulfur.

Die Stahlcharge OW7 weist insgesamt 109 Partikel auf (vgl. Tabelle 6). Tabelle 12 gibt einen Überblick über die Anzahl der Partikel mit ihren chemischen Elementen und ihrem chemischen Gehalt in Masse-%. Alle untersuchten Partikel weisen Calcium auf. Fast alle weisen Schwefel auf. Aluminium ist nur in zwei Partikeln in geringer Menge vorhanden und Mangan ist in lediglich 22 Partikeln enthalten. Auch Titan und Nickel sind in einigen wenigen Partikeln vorhanden. Bild 7 zeigt das Ca-Mg-S- und Ca-Ti-S-Dreistoffdiagramm der Stahlcharge OW7. Es wird bestätigt, dass die meisten Einschlüsse aus Calcium und Schwefel bestehen.

5.3.2 Steel batch S9

5.3.2 Stahlcharge S9

Steel batch S9 shows only 12 particles in total in the area investigated (compare Table 6). Table 13 gives an overview of the num-

Die Stahlcharge S9 weist im untersuchten Bereich insgesamt nur 12 Partikel auf (vgl. Tabelle 6). Tabelle 13 gibt einen Überblick über

| Chemical element | Mn | S | Al | Ca | Mg | Cr | Ti | Zr | |
|------------------------------|------|---|------|----|-------|------|------|-------|-------|
| Number of particles | 0 | 9 | 0 | 11 | 6 | 3 | 3 | 3 | |
| Chemical content in weight-% | max. | – | 8.59 | – | 26.93 | 4.23 | 1.10 | 29.96 | 27.75 |
| | min. | – | 2.51 | – | 1.83 | 1.50 | 0.94 | 14.44 | 17.42 |

Table 13. Number of particles with the specified chemical elements of steel batch S9

Tabelle 13. Partikelanzahl mit den angegebenen chemischen Elementen der Stahlcharge S9

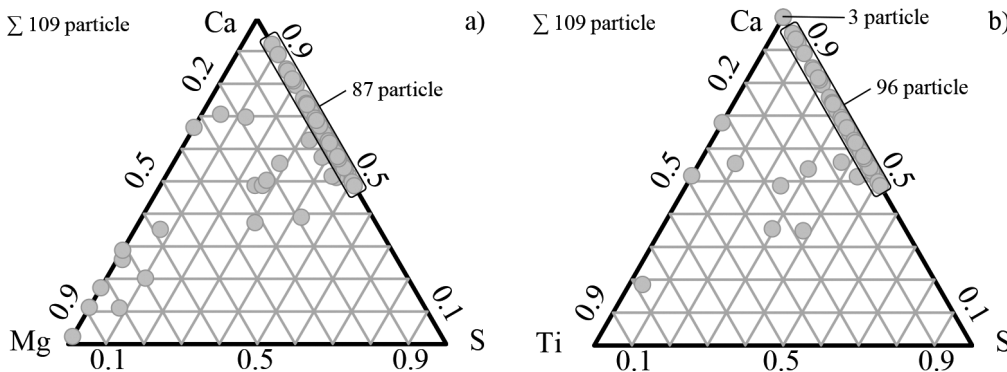
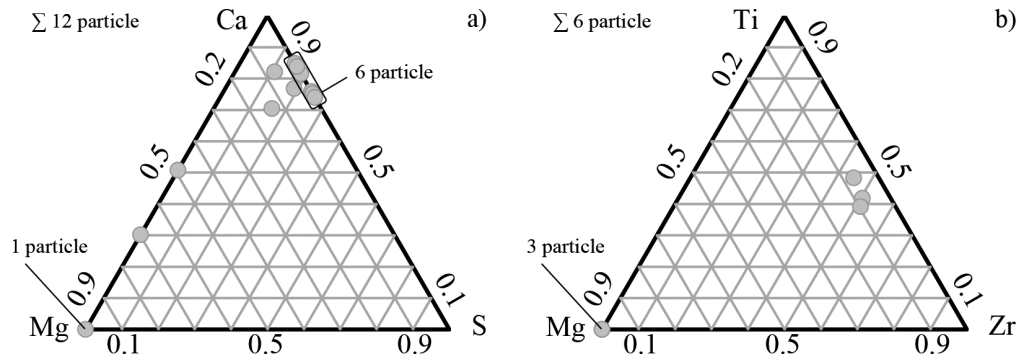


Fig. 7. Ternary diagrams of steel batch OW7 – a) Ca-Mg-S and b) Ca-Ti-S

Bild 7. Dreistoffdiagramm der Stahlcharge OW7 – a) Ca-Mg-S und b) Ca-Ti-S

Fig. 8. Ternary diagrams of steel batch S9 – a) Ca-Mg-S and b) Ti-Mg-Zr

Bild 8. Dreistoffdiagramm der Stahlcharge S9 – a) Ca-Mg-S und b) Ti-Mg-Zr



ber of particles with their chemical element and their chemical content in weight-%. Calcium is always present except in one particle. Sulfur and manganese are also present in most of the particles. Small amounts of chromium are present in three particles. Titanium and zirconium are also present in three particles. In these three particles, no sulfur is present. Figure 8 shows the ternary diagrams. Zirconium are usually attributed to oddments of ladle shroud and submerged entry nozzle.

die Anzahl der Partikel mit ihrem chemischen Element und ihrem chemischen Gehalt in Masse-%. Calcium ist mit Ausnahme eines Partikels immer vorhanden. Auch Schwefel und Mangan sind in den meisten Partikeln vorhanden. Geringe Mengen an Chrom sind in drei Partikeln enthalten. Titan und Zirkonium sind ebenfalls in drei Partikeln enthalten. In diesen drei Partikeln ist kein Schwefel enthalten. Bild 8 zeigt die Dreistoffdiagramme. Zirkonium wird in der Regel auf Reste der Pfannenausmauerung und des Tauchrohrs zurückgeführt.

6 Comparison of the results of the investigations

6 Vergleich der Ergebnisse der Untersuchungen

6.1 Inclusion types according to standards and according to ternary diagrams

6.1 Einschlussarten nach Norm und nach den Dreistoffdiagrammen

Figure 9 shows the result of the degree of cleanliness determination according to SEP 1571, Method K [20] (SEP: steel test specification). In the steel batches OW2, OW5, OW7 and S9 only oxide inclusions were determined in different proportions. Steel batches OW1, OW4 and OW3 contain sulfide and oxide inclusions, also in different proportions. In steel batches OW1, OW3 and OW4, the sulfide inclusions are decisive, whereas in the other steel batches the oxide inclusions have a larger proportion.

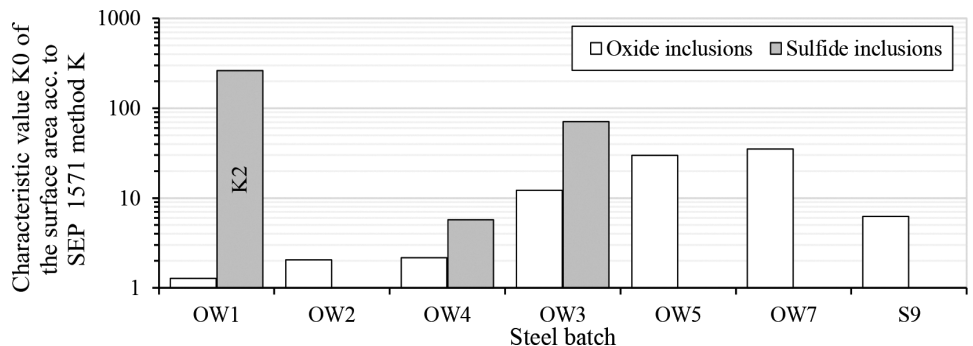
Bild 9 zeigt das Ergebnis der Reinheitsgradbestimmung nach SEP 1571, Methode K [20] (SEP: Stahl-Eisen-Prüfblatt). In den Stahlchargen OW2, OW5, OW7 und S9 wurden nur Oxideinschlüsse in unterschiedlichen Anteilen festgestellt. Die Stahlchargen OW1, OW4 und OW3 enthalten Sulfid- und Oxideinschlüsse, ebenfalls in unterschiedlichen Anteilen. Bei den Stahlchargen OW1, OW3 und OW4 sind die Sulfideinschlüsse ausschlaggebend, während bei den anderen Stahlchargen die Oxideinschlüsse einen größeren Anteil haben.

Table 14 shows a more differentiated classification. Here the inclusions of the steel batches are classified according to inclusion types based on the degree of cleanliness determination according to ISO 4967, Method A [21]. In all steel batches, inclusion types D

Tabelle 14 zeigt eine differenziertere Klassifizierung. Hier werden die Einschlüsse der Stahlchargen nach Einschlusstypen auf Basis der Reinheitsgradbestimmung nach ISO 4967, Methode A [21] klassifiziert. In allen Stahlchargen sind die Einschlusstypen D

Fig. 9. Characteristic value K0 of the surface area according to SEP 1571, Method K[20] for the steel batches investigated (Note: The value for the sulfide inclusions of steel batch OW1 is the characteristic value for size class K2)

Bild 9. K0-Kennwert nach SEP 1571, Methode K[20] für die untersuchten Stahlchargen (Hinweis: Der Wert für die Sulfideinschlüsse der Stahlcharge OW1 ist der Kennwert für die Größenklasse K2)



| Steel batch | Inclusion type | | | | | | | | |
|-------------|----------------|-------|-------|-------|------|-------|------|-------|-------------------|
| | Sulfide | | Oxide | | | | | | Sulfide |
| | A | | B | | C | | D | | D_{sulf} |
| | fine | thick | fine | thick | fine | thick | fine | thick | |
| OW1 | 2.48 | 1.22 | 0.21 | 0.02 | 0 | 0 | 0.50 | 0.33 | 0.21 |
| OW2 | 0.25 | 0 | 0.83 | 0 | 0 | 0 | 1.00 | 0.50 | 0 |
| OW4 | 0.80 | 0.42 | 0.17 | 0.01 | 0.04 | 0.02 | 1.07 | 0.63 | 0.77 |
| OW3 | 1.22 | 0.84 | 0.35 | 0.18 | 0.01 | 0 | 0.83 | 0.62 | 1.30 |
| OW5 | 0.066 | 0 | 0.48 | 0.25 | 0 | 0 | 0.83 | 0.54 | 1.70 |
| OW7 | 0 | 0 | 1.25 | 0 | 0.25 | 0 | 1.00 | 0.50 | 0 |
| S9 | 0 | 0 | 1.24 | 0.04 | 0 | 0 | 0.99 | 0.50 | 0.05 |

Table 14. Classification according to the to the inclusion types based on the degree of cleanliness determination according to ISO 4967, Method A [21]

Tabelle 14. Klassifizierung nach den Einschlussarten auf der Grundlage der Bestimmung des Reinheitsgrades nach ISO 4967, Methode A [21]

and B (oxide) are present in different proportions. Inclusion type C (oxide) is only present in very small proportions in steel batches OW4, OW3 and OW7. Sulfide inclusion type A is present in steel batches OW1 to OW5; whereas sulfide inclusion type D_{sulf} is present in OW1, OW3 to OW5 and S9.

Small differences to the characterization in Figure 9 according to SEP 1571, Method K [20] exist. A good concordance exists for steel batches OW1, OW4, OW3, and OW7. Fine sulfide inclusions of the type A were characterized in Table 14 for steel batches OW2 and OW5; whereas in Figure 9 no sulfide inclusions are present. In steel batch OW5, type D_{sulf} inclusions were also determined. Steel batch S9 shows only oxide inclusions in Figure 9. However, sulfide inclusions (D_{sulf}) are also present according to Table 14.

In the following the inclusions types determined based on the degree of cleanliness determinations according to SEP 1571, Method K [20] and ISO 4967, Method A [21] are compared to the derived inclusion types based on the particle analysis using the ternary diagrams. The approach was that, in principle, the highest proportion of a chemical element present determines the chemical composition. However, it has to be explicitly pointed out that the largest part of the particles shows traces of other elements and thus could also be evaluated as mixed inclusions.

Table 15 shows the classification of the particles analyzed of the steel batches into the inclusion types according to ISO 4967, Method A [21] respectively SEP 1571, Method K [20]. The inclusion types oxides (type B, D) and calcium sulfides (type D_{sulf}) are present in almost all steel batches. Manganese sulfide inclusions (type A) are present in steel batches OW1 and OW3 to OW5. Silicon dioxide inclusions (type C) are not present. The classification based on the particles is in good concordance to the determined inclusions types by the degree of cleanliness determination, which is shown in Table 14. Only small differences are visible.

und B (Oxid) in unterschiedlichen Anteilen vorhanden. Der Einschlusstyp C (Oxid) ist nur in sehr geringen Anteilen in den Stahlchargen OW4, OW3 und OW7 vorhanden. Sulfideinschlüsse des Typs A sind in den Stahlchargen OW1 bis OW5 vorhanden, während Sulfideinschlüsse des Typs D_{sulf} in OW1, OW3 bis OW5 und S9 vorhanden sind.

Es bestehen geringe Unterschiede zur Charakterisierung in Bild 9 nach SEP 1571, Methode K [20]. Eine gute Übereinstimmung besteht für die Stahlchargen OW1, OW4, OW3 und OW7. Feine Sulfideinschlüsse des Typs A wurden in Tabelle 14 für die Stahlchargen OW2 und OW5 charakterisiert, während in Bild 9 keine Sulfideinschlüsse vorhanden sind. In der Stahlcharge OW5 wurden auch Sulfideinschlüsse des Typs D_{sulf} festgestellt. Die Stahlcharge S9 zeigt in Bild 9 nur Oxideinschlüsse. Es sind jedoch auch Sulfideinschlüsse (D_{sulf}) gemäß Tabelle 14 vorhanden.

Im Folgenden werden die auf Basis der Reinheitsgradbestimmungen nach SEP 1571, Methode K [20] und ISO 4967, Methode A [21] ermittelten Einschlusstypen mit den abgeleiteten Einschlusstypen auf Basis der Partikelanalyse unter Verwendung der Dreistoffdiagramme verglichen. Der Ansatz war, dass grundsätzlich der höchste Anteil eines vorhandenen chemischen Elements die chemische Zusammensetzung bestimmt. Es muss jedoch ausdrücklich darauf hingewiesen werden, dass der größte Teil der Partikel Spuren anderer Elemente aufweist und somit auch als gemischte Einschlüsse bewertet werden könnte.

Tabelle 15 zeigt die Zuordnung der analysierten Partikel der Stahlchargen zu den Einschlusstypen nach ISO 4967, Methode A [21] bzw. SEP 1571, Methode K [20]. Die Einschlussarten Oxide (Typ B, D) und Calciumsulfide (Typ D_{sulf}) sind in fast allen Stahlchargen vorhanden. Mangansulfideinschlüsse (Typ A) sind in den Stahlchargen OW1 und OW3 bis OW5 vorhanden. Siliziumdioxideinschlüsse (Typ C) sind nicht vorhanden. Die Klassifizierung anhand der Partikel stimmt gut mit den durch die Reinheitsgradbestimmung ermittelten Einschlusstypen überein, die in Tabelle 14 dargestellt sind. Es sind nur geringe Unterschiede erkennbar.

| Steel batch | Percentage of inclusion type and chemical composition | | | | | |
|-------------|---|-------|--------------------------------|-------------------|------------------|------------------|
| | A | B, D | | D _{sulf} | C | Mixed inclusions |
| | MnS | MgO | Al ₂ O ₃ | CaS | SiO ₂ | |
| OW1 | 58.80 | – | 41.20 | – | – | 85.38 |
| OW2 | – | 15.94 | – | 84.06 | – | 94.20 |
| OW4 | 72.75 (+ proportions of Ca) | – | 11.30 | 15.95 | – | 99.85 |
| OW3 | 72.36 | 0.15 | 2.57 | 24.92 | – | 84.44 |
| OW5 | 20.00 | – | 31.67 | 48.33 | – | 91.11 |
| OW7 | – | 7.34 | – | 92.66 | – | 20.18 |
| S9 | – | – | – | 100.00 | – | (Ti + Zr) |

Table 15. Percentage classification of the particles analyzed of the steel batches into the inclusion classes according to ISO 4967, Method A [21] respectively SEP 1571, Method K [20]

Tabelle 15. Prozentuale Zuordnung der analysierten Partikel der Stahlchargen zu den Einschlussklassen nach ISO 4967, Methode A [21] bzw. SEP 1571, Methode K [20]

6.2 Chemical elements in the base material and in the particles

Table 16 presents a subset of Table 2 and shows an extract of the chemical composition of the base material. Only chemical elements present in the particles are shown. All steel batches contain manganese in different proportions. Steel batch OW7 shows the lowest content and the MnCr alloyed steels the highest values. Steel batches OW2, OW5, OW7 and S9 show only a sulfur content of 0.001 weight-% in the base material. Steel batch OW1 shows the highest content of 0.019 weight-%. The aluminum content is highest in steel batch OW2 and second highest in steel batch OW7. Steel batch OW5 shows the lowest value, however, in this steel batch niobium was alloyed to partially substitute aluminum. Chromium and silicon are present in the base material of all steel batches. Steel batch OW7 shows the lowest content of chromium and silicon, but for nickel, this steel batch shows the highest value.

6.2 Chemische Elemente im Grundwerkstoff und in den Partikeln

Tabelle 16 ist eine Teilmenge von Tabelle 2 und zeigt einen Auszug aus der chemischen Zusammensetzung des Grundwerkstoffs. Es werden nur chemische Elemente gezeigt, die in den Partikeln vorhanden sind. Alle Stahlchargen enthalten Mangan in unterschiedlichen Anteilen. Die Stahlcharge OW7 weist den niedrigsten Gehalt auf, die MnCr-legierten Stähle die höchsten Werte. Die Stahlchargen OW2, OW5, OW7 und S9 weisen nur einen Schwefelgehalt von 0,001 Masse-% im Grundmaterial auf. Die Stahlcharge OW1 weist mit 0,019 Masse-% den höchsten Gehalt auf. Der Aluminiumgehalt ist in der Stahlcharge OW2 am höchsten und in der Stahlcharge OW7 am zweithöchsten. Die Stahlcharge OW5 weist den niedrigsten Wert auf, allerdings wurde bei dieser Stahlcharge Niob als teilweiser Ersatz für Aluminium zulegiert. Chrom und Silizium sind im Grundwerkstoff aller Stahlchargen enthalten. Die Stahlcharge OW7 weist den niedrigsten Gehalt an Chrom und Silizium auf, aber für Nickel den höchsten.

| Steel batch | Chemical composition in weight-% | | | | | | | | | | |
|-------------|----------------------------------|-------|-------|----|----|------|------|-------|----|------|----|
| | Mn | S | Al | Ca | Mg | Cr | Si | Nb | Ti | Ni | Zr |
| OW1 | 1.17 | 0.019 | 0.026 | ND | ND | 1.15 | 0.23 | – | ND | 0.12 | ND |
| OW2 | 1.16 | 0.001 | 0.114 | | | 1.17 | 0.14 | – | | 0.15 | |
| OW4 | 1.31 | 0.006 | 0.031 | | | 1.25 | 0.17 | – | | 0.16 | |
| OW3 | 0.54 | 0.011 | 0.025 | | | 1.74 | 0.26 | – | | 1.56 | |
| OW5 | 0.54 | 0.001 | 0.009 | | | 1.65 | 0.27 | 0.058 | | 1.42 | |
| OW7 | 0.23 | 0.001 | 0.082 | | | 0.38 | 0.08 | – | | 2.24 | |
| S9 | 0.78 | 0.001 | 0.033 | | | 1.15 | 0.31 | – | | 1.41 | |

Table 16. Chemical composition of the steel batches (abbreviated form) (key: ND – not determined)

Tabelle 16. Chemische Zusammensetzung der Stahlchargen (in gekürzter Form) (Legende: ND – nicht bestimmt)

| Steel batch | Proportion of particles with the respective chemical element relative to the total number of particles in % | | | | | | | | | | |
|-------------|---|------|------|------|------|----|----|----|----|----|----|
| | Mn | S | Al | Ca | Mg | Cr | Si | Nb | Ti | Ni | Zr |
| OW1 | 85 | 84 | 100 | 8 | 84 | 17 | – | – | – | – | |
| OW2 | 13 | 93 | 80 | 94 | 100 | 54 | 15 | – | 23 | – | |
| OW4 | 99.9 | 99.9 | 100 | 99.8 | 99.9 | 39 | – | – | – | – | |
| OW3 | 84 | 85 | 99.9 | 78 | 100 | 81 | – | – | – | – | |
| OW5 | 89 | 98 | 100 | 91 | 99 | 68 | 64 | 11 | – | – | |
| OW7 | – | 95 | 2 | 100 | 20 | – | – | – | 9 | 6 | |
| S9 | – | 75 | – | 92 | 50 | 25 | – | – | 25 | – | 25 |

Table 17. Proportion of particles with the respective chemical element relative to the total number of particles

Tabelle 17. Anteil der Partikel mit dem jeweiligen chemischen Element im Verhältnis zur Gesamtzahl der Partikel

In Table 17, the proportion of particles with the respective chemical element relative to the total number of particles (see Table 6) are compared. If a chemical element is present in all particles in one steel batch, the value is 100 %; for example in steel batch OW1: manganese was present in 85 % of the particles investigated in this steel batch. Sulfur, calcium and magnesium are present in all particles of these ultra-clean gear steels in different proportions. Except in the steel batches OW7 and S9, manganese is present in the particles of all other steel batches. The particles of steel batch OW7 only show a small amount of aluminum. No aluminum is present in the particles of steel batch S9. However, in steel batches OW1 to OW6 most of the particles contain aluminum. Chromium is also present in the particles of all steel batches except in the particles of steel batch OW7. Silicon is present in some particles in steel batch OW2 and in most of the particles in steel batch OW5. Steel batch OW5 is intentionally niobium alloyed. Niobium is present in approximately 11 % of the respective particles of steel batch OW5. Titanium is present up to 25 % in steel batches OW2, OW7 and S9. Nickel is present only in a small number of particles in steel batch OW7. Zirconium is present in 25 % of the particles of steel batch S9.

7 Conclusions

Slight differences are visible in the determination of the degree of cleanliness and characterization of non-metallic inclusions according to the standards and in the analysis of non-metallic inclusions using particle analysis. This is plausible, since in the particle analysis the chemical composition is determined for each particle. After evaluation according to the standards, either an image series comparison or a particle-based evaluation is carried out, but in both cases, a distinction is made based on the morphology and the gray scale values. Gray particles are evaluated as sulfides, black particles as oxides.

In Tabelle 17 wird der Anteil der Partikel mit dem jeweiligen chemischen Element im Verhältnis zur Gesamtzahl der Partikel (siehe Tabelle 6) verglichen. Wenn ein chemisches Element in allen Partikeln einer Stahlcharge vorhanden ist, beträgt der Wert 100 %; zum Beispiel in der Stahlcharge OW1: Mangan war in 85 % der untersuchten Partikel dieser Stahlcharge vorhanden. Schwefel, Calcium und Magnesium sind in allen Partikeln dieser hochreinen Zahnradstähle in unterschiedlichen Anteilen vorhanden. Außer in den Stahlchargen OW7 und S9 ist Mangan in den Partikeln aller anderen Stahlchargen enthalten. Die Partikel der Stahlcharge OW7 weisen nur einen geringen Anteil an Aluminium auf. In den Partikeln der Stahlcharge S9 ist kein Aluminium enthalten. In den Stahlchargen OW1 bis OW6 enthalten die meisten Partikel jedoch Aluminium. Chrom ist ebenfalls in den Partikeln aller Stahlchargen enthalten, außer in den Partikeln der Stahlcharge OW7. Silizium ist in einigen Partikeln der Stahlcharge OW2 und in den meisten Partikeln der Stahlcharge OW5 enthalten. Die Stahlcharge OW5 ist bewusst mit Niob legiert. Niob ist in etwa 11 % der entsprechenden Partikel der Stahlcharge OW5 enthalten. Titan ist mit bis zu 25 % in den Stahlchargen OW2, OW7 und S9 nachzuweisen. Nickel ist nur in einer kleinen Anzahl von Partikeln der Stahlcharge OW7 enthalten. Zirkonium ist in 25 % der Partikel der Stahlcharge S9 festzustellen.

7 Schlussfolgerungen

Bei der Bestimmung des Reinheitsgrades und der Charakterisierung der nicht-metallischen Einschlüsse nach Norm und bei der Analyse der nicht-metallischen Einschlüsse mittels Partikelanalyse sind leichte Unterschiede erkennbar. Dies ist plausibel, da bei der Partikelanalyse die chemische Zusammensetzung für jedes Partikel bestimmt wird. Nach der Auswertung nach Norm wird entweder ein Bildreihenvergleich oder eine partikelbasierte Auswertung durchgeführt, wobei in beiden Fällen eine Unterscheidung anhand der Morphologie und der Grauwerte vorgenommen wird. Graue Partikel werden als Sulfide, schwarze Partikel als Oxide bewertet.

Calcium was added to all steel batches to bind the particles globularly [3, 4]. Magnesium was also added to all steel batches as a deoxidizing and desulfurizing agent. This was also intended to achieve a better oxidic and sulfidic degree of cleanliness. The aluminum content of steel batches OW1 to OW5 indicates aluminum deoxidation. By adding aluminum, a fine grain size can also be achieved. In case of case-hardening steels, aluminum oxides (Al_2O_3) can form from the aluminum and the oxygen in the steel heat. [2] The silicon content in steel batches OW2 and OW5 indicates silicon deoxidation in addition to the aluminum deoxidation. This results in roundish, mostly hard and brittle silicates. During the rolling process, these do not deform, but are arranged in rows [2].

When Table 16 and Table 17 are compared, the following can be stated: Steel batches OW7 and S9 contain manganese. In the particles, however, there is no manganese present. Steel batch OW2, which is higher manganese alloyed, shows manganese only in a small number of particles. Steel batches OW2, OW7 and S9 show only a sulfur content of 0.001 weight-% in the material. However, a relative high amount of sulfur is present in the particles. Furthermore, a high calcium content is present. This indicates that the manganese content has been completely bound in the steel and the calcium content has bound the remaining element portions. Steel batches OW2 and OW7 show the highest aluminum content in comparison to the other steel batches. In steel batch OW2, a high proportion of the particles contains aluminum, whereas in steel batch OW7 almost no particles contain aluminum. This indicates that the high aluminum content in steel batch OW7 was almost completely bound by nitrogen to form aluminum nitrides to increase the fine grain stability. Steel batches OW1, OW3 and OW4 show the highest content of sulfur in the material. High amounts of manganese and sulfur are present in the particles, which contain almost 100 % aluminum, in these steel batches. This points to the fact that mixed aluminum, sulfur and manganese inclusions are present in these steel batches. In steel batch OW1, only a small amount of calcium is present in the particles. Except for steel batch OW7, chromium is also found in the particles. The chromium content of steel batch OW7 is the lowest in comparison. The absence of chromium in the particles can be attributed to this. Silicon is present in the base material of steel batches. However, it is present only in steel batches OW2 and OW5 in the particles. Steel batch OW7 shows the highest nickel content in the material and is the only steel batch that shows the nickel in a few particles. Niobium was intentionally alloyed to partially substitute aluminum in steel batch OW5. Niobium is present in a small number of particles.

For the MnCr-alloyed steel batches OW1, OW2 and OW4, it can be summarized that calcium was added to these batches to improve the sulfidic cleanliness level. The challenge here is to bind off the manganese content so that it does not contribute to the formation of manganese sulfide inclusions. This was accomplished completely for steel batch OW2, only partially for steel batch OW4, and bare-

Allen Stahlchargen wurde Calcium zugesetzt, um die Partikel kugelförmig zu binden [3, 4], außerdem wurde allen Stahlchargen Magnesium als Desoxidations- und Entschwefelungsmittel zugesetzt. Damit sollte ebenfalls ein besserer oxidischer und sulfidischer Reinheitsgrad erreicht werden. Der Aluminiumgehalt der Stahlchargen OW1 bis OW5 weist auf eine Aluminiumdesoxidation hin. Durch die Zugabe von Aluminium kann auch eine feine Korngröße erreicht werden. Bei Einsatzstählen können sich aus dem Aluminium und dem Sauerstoff in der Stahlschmelze Aluminiumoxide (Al_2O_3) bilden [2]. Der Siliziumgehalt in den Stahlchargen OW2 und OW5 deutet neben der Aluminiumdesoxidation auch auf eine Siliziumdesoxidation hin. Das Ergebnis sind rundliche, meist harte und spröde Silikate. Diese verformen sich beim Walzen nicht, sondern sind in Reihen angeordnet [2].

Beim Vergleich der Tabelle 16 mit der Tabelle 17 lässt sich Folgendes feststellen: Die Stahlchargen OW7 und S9 enthalten Mangan. In den Partikeln ist jedoch kein Mangan vorhanden. Die Stahlcharge OW2, die höher manganlegiert ist, weist nur in einer geringen Anzahl von Partikeln Mangan auf. Die Stahlchargen OW2, OW7 und S9 weisen nur einen Schwefelgehalt von 0,001 Masse-% im Werkstoff auf. In den Partikeln ist jedoch eine relativ hohe Menge an Schwefel vorhanden. Außerdem ist ein hoher Calciumgehalt festzustellen. Dies deutet darauf hin, dass der Mangangehalt vollständig im Stahl gebunden wurde und der Calciumgehalt die restlichen Elementanteile gebunden hat. Die Stahlchargen OW2 und OW7 weisen im Vergleich zu den anderen Stahlchargen die höchsten Aluminiumgehalte auf. In der Stahlcharge OW2 enthält ein hoher Anteil der Partikel Aluminium, während in der Stahlcharge OW7 fast keine Partikel Aluminium enthalten. Dies deutet darauf hin, dass der hohe Aluminiumgehalt in der Stahlcharge OW7 fast vollständig durch Stickstoff gebunden wurde, um Aluminiumnitride zu bilden und die Feinkornstabilität zu erhöhen. Die Stahlchargen OW1, OW3 und OW4 weisen die höchsten Schwefelgehalte im Werkstoff auf. In diesen Stahlchargen sind hohe Mengen an Mangan und Schwefel in den Partikeln vorhanden, die fast 100 % Aluminium enthalten. Dies deutet darauf hin, dass in diesen Stahlchargen gemischte Aluminium-, Schwefel- und Manganeinschlüsse vorhanden sind. In der Stahlcharge OW1 ist nur eine geringe Menge an Calcium in den Partikeln vorhanden. Mit Ausnahme der Stahlcharge OW7 ist auch Chrom in den Partikeln festzustellen. Der Chromgehalt der Stahlcharge OW7 ist im Vergleich am niedrigsten. Das Fehlen von Chrom in den Partikeln kann darauf zurückgeführt werden. Silizium ist im Grundwerkstoff der Stahlchargen vorhanden. Allerdings ist es nur in den Stahlchargen OW2 und OW5 in den Partikeln vorhanden. Die Stahlcharge OW7 weist den höchsten Nickelgehalt im Werkstoff auf und ist die einzige Stahlcharge, die Nickel in einigen wenigen Partikeln aufweist. Niob wurde bewusst zulegiert, um Aluminium in der Stahlcharge OW5 teilweise zu ersetzen. Niob ist in einer geringen Anzahl von Partikeln enthalten.

Für die MnCr-legierten Stahlchargen OW1, OW2 und OW4 lässt sich zusammenfassen, dass diesen Chargen Calcium zugesetzt wurde, um den sulfidischen Reinheitsgrad zu verbessern. Die Herausforderung besteht hier darin, den Mangangehalt so zu binden, dass er nicht zur Bildung von Mangansulfideinschlüssen beiträgt. Dies ist bei der Stahlcharge OW2 vollständig, bei der

ly at all for steel batch OW1. Manganese sulfides and mixed oxide inclusions are present in the CrNiMo-alloyed steel batches. In the case of steel batches OW7 and S9, it is noticeable that the respective base materials have very low sulfur contents. In both cases, the data basis is quite small, but it can be stated that the occurrence of manganese sulfides was successfully prevented by calcium. Furthermore, (almost) no aluminum is found in the particles.

Finally, it can be stated that calcium was added to all steel batches in order to bind off the sulfur and improve the sulfidic degree of cleanliness. In addition, magnesium was added to all steel batches to promote deoxidation and desulfurization and thus also prevent the formation of aluminum oxides and manganese sulfides, which should lead to a better oxidic and sulfidic degree of cleanliness. However, it can also be noted that despite all the measures taken, all steel batches continue to show a certain amount of sulfur in the particles.

8 Comparison with the crack-initiating non-metallic inclusions from the experimental investigations

In the following, the question will be answered whether the measures taken were able to prevent any crack initiation at the corresponding inclusion type. Table 18 shows exemplary crack area characteristics of a fish-eye fracture in the tooth root fillet of case-hardened, shot-peened gears made out of ultra-clean gear steels. More information on such crack area characteristics, can be found in [6, 11, 17, 25]. Table 19 shows the percentages of the inclusion types and chemical compositions of the crack-initiating non-metallic inclusions from the experimental investigations on the FZG back-to-back and Pulsator test rig.

Steel batch OW1 only failed at manganese sulfide inclusions (type A). Steel batch OW2 failed only at oxide inclusions, with mixed oxide inclusions present (type B and D). The most failures in steel batch OW4 were due to mixed inclusions ($\text{CaS}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$) and in equal shares at B, D and D_{sulf} type inclusions. Steel batch OW3 failed in one case at a manganese sulfide inclusion (type A). Most of the crack initiations were due to aluminum oxide inclusions, mixed inclusions ($\text{CaS}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$) and calcium sulfide inclusions. Most of the failures in steel batch OW5 were due to aluminum oxide inclusions and a small number of mixed inclusions ($\text{CaS}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$). Steel batch OW7 showed failures due to calcium sulfide inclusions (type D_{sulf}) and magnesium oxide inclusions. Steel batch S9 failed 100 % at calcium sulfide inclusions (type D_{sulf}).

- **Comparison to SEP 1571 [20] (see Figure 9):** Steel batch OW1 shows the highest value for sulfide inclusions for all the steel batches. This is evident from the crack-initiating inclusions, which were 100 % manganese sulfide. However, the aluminum oxide inclusions present in steel batch OW1 were not critical for

Stahlcharge OW4 nur teilweise und bei der Stahlcharge OW1 so gut wie gar nicht gelungen. Mangansulfide und Misch-Oxideinschlüsse sind in den CrNiMo-legierten Stahlchargen vorhanden. Bei den Stahlchargen OW7 und S9 fällt auf, dass die jeweiligen Grundwerkstoffe sehr geringe Schwefelgehalte aufweisen. In beiden Fällen ist die Datenbasis recht klein, aber es kann festgestellt werden, dass das Auftreten von Mangansulfiden durch Calcium erfolgreich verhindert wurde. Außerdem ist (fast) kein Aluminium in den Partikeln zu finden.

Abschließend kann festgestellt werden, dass allen Stahlchargen Calcium zugesetzt wurde, um den Schwefel zu binden und den sulfidischen Reinheitsgrad zu verbessern. Darüber hinaus wurde allen Stahlchargen Magnesium zugesetzt, um die Desoxidation und Entschwefelung zu fördern und damit auch die Bildung von Aluminiumoxiden und Mangansulfiden zu verhindern, was zu einem besseren oxidischen und sulfidischen Reinheitsgrad führen sollte. Es ist jedoch auch festzustellen, dass trotz aller Maßnahmen alle Stahlchargen weiterhin eine gewisse Menge an Schwefel in den Partikeln aufweisen.

8 Vergleich mit den rissauslösenden nicht-metallischen Einschlüssen aus den experimentellen Untersuchungen

Im Folgenden soll die Frage beantwortet werden, ob die getroffenen Maßnahmen eine Rissinitiierung am entsprechenden Einschlusstyp verhindern konnten. Tabelle 18 zeigt beispielhaft die Bruchflächencharakteristik eines Bruchlinsenversagens in der Zahnfußrundung von einsatzgehärteten, kugelgestrahlten Zahnrädern aus hochreinen Zahnradstählen. Weitere Informationen zu solchen Bruchflächenmerkmalen sind in [6, 11, 17, 25] zu finden. Tabelle 19 zeigt die prozentualen Anteile der Einschlussarten und chemischen Zusammensetzungen der rissauslösenden nicht-metallischen Einschlüsse aus den experimentellen Untersuchungen auf dem FZG-Stirnradverspannungs- und Pulsator-Prüfstand.

Die Stahlcharge OW1 versagte nur an Mangansulfid-Einschlüssen (Typ A). Stahlcharge OW2 versagte nur an Oxideinschlüssen, wobei Misch-Oxideinschlüsse vorhanden waren (Typ B und D). Die meisten Ausfälle in der Stahlcharge OW4 waren auf gemischte Einschlüsse ($\text{CaS}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$) und zu gleichen Teilen auf Einschlüsse des Typs B, D und D_{sulf} zurückzuführen. Die Stahlcharge OW3 versagte in einem Fall an einem Mangansulfid-Einschluss (Typ A). Die meisten Rissinitiierungen waren auf Aluminiumoxideinschlüsse, gemischte Einschlüsse ($\text{CaS}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$) und Calciumsulfideinschlüsse zurückzuführen. Die meisten Ausfälle in der Stahlcharge OW5 waren auf Aluminiumoxideinschlüsse und eine geringe Anzahl von gemischten Einschlüssen ($\text{CaS}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$) zurückzuführen. Die Stahlcharge OW7 zeigte Ausfälle aufgrund von Calciumsulfideinschlüssen (Typ D_{sulf}) und Magnesiumoxideinschlüssen. Die Stahlcharge S9 versagte zu 100 % an Calciumsulfideinschlüssen (Typ D_{sulf}).

- **Vergleich mit SEP 1571 [20] (siehe Bild 9):** Die Stahlcharge OW1 weist von allen Stahlchargen den höchsten Wert für Sulfideinschlüsse auf. Dies ist aus den rissauslösenden Einschlüssen ersichtlich, die zu 100 % aus Mangansulfid bestanden. Die in der Stahlcharge OW1 vorhandenen Aluminiumoxideinschlüsse waren

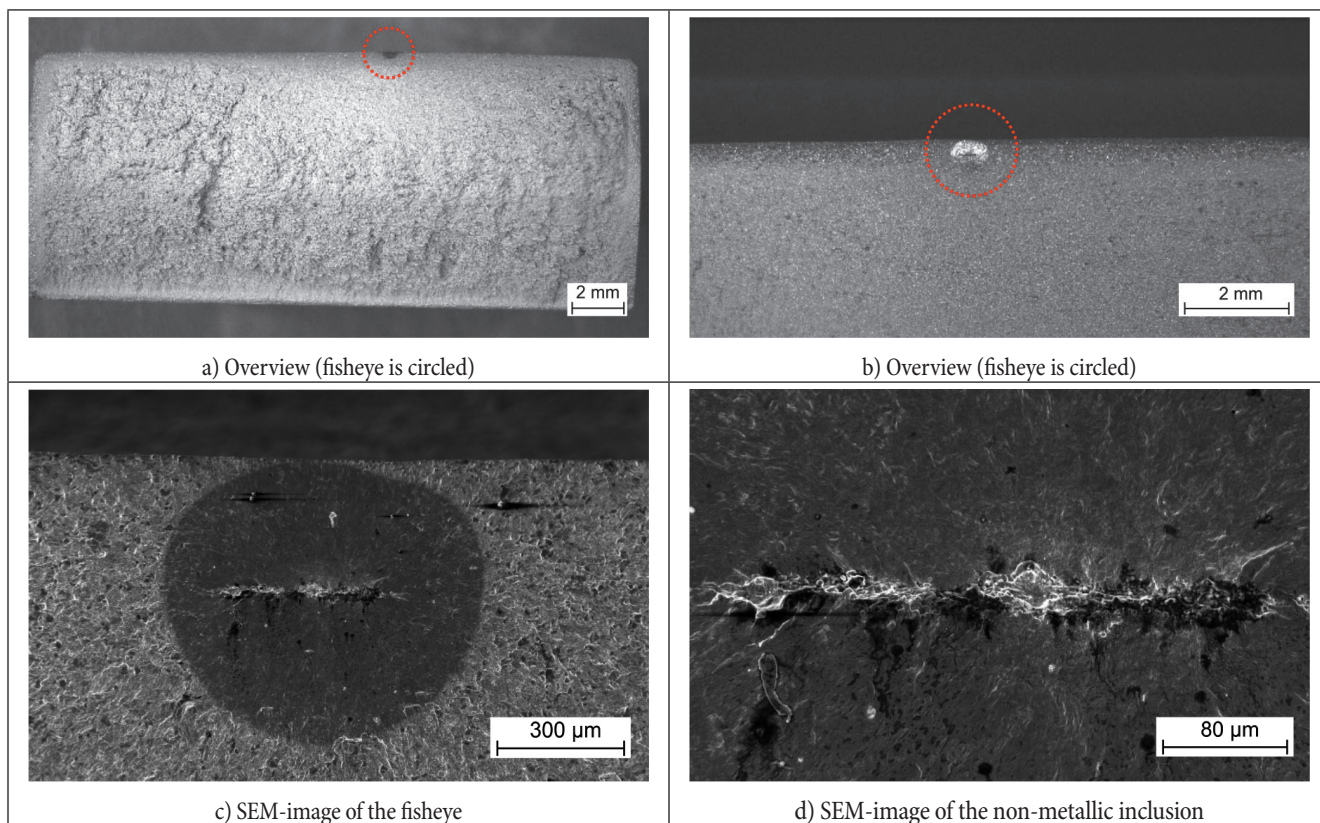


Table 18. Exemplary crack area characteristics of a fisheye fracture in the tooth root fillet of case-hardened, shot-peened gears made out of ultra-clean gear steels (using the example of variant OW3, gear size $m_n = 5$ mm) [17]

Tabelle 18. Exemplarische Bruchflächencharakteristik eines Bruchlinsenversagens im Zahnfuß eines einsatzgehärteten, kugelgestrahlten Zahnrad aus einem hochreinen Zahnradstahl (am Beispiel der Variante OW3, Zahnradbaugröße $m_n = 5$ mm) [17]

Table 19. Percentages of the inclusion types and chemical compositions of the crack-initiating non-metallic inclusions from the experimental investigations on the FZG back-to-back and Pulsator test rig

Tabelle 19. Prozentuale Anteile der Einschlusstypen und chemische Zusammensetzungen der rissauslösenden nicht-metallischen Einschlüsse aus den experimentellen Untersuchungen am FZG-Stirnradverspannungs- und Pulsatorprüfstand

| Steel batch | Number of crack-initiating non-metallic inclusion | Inclusion type and chemical composition | | | | |
|-------------|---|---|--|--|-------------------|------------------|
| | | A | B, D | | D _{sulf} | C |
| | | MnS | MgO | Al ₂ O ₃ | CaS | SiO ₂ |
| OW1 | 13 | 100 % | - | - | - | - |
| OW2 | 7 | - | 57 % | - | - | - |
| | | | 43 % (MgO.Al ₂ O ₃) | | | |
| OW4 | 4 | - | - | 25 % | 25 % | - |
| | | | | 50 % (CaS.Al ₂ O ₃) | | |
| OW3 | 11 | 9.1 % | - | 45 % | 18.2 % | - |
| | | | | 27.3 % (CaS.Al ₂ O ₃) | | |
| OW5 | 7 | - | - | 85.7 % | - | - |
| | | | | 14.3 % (CaS.Al ₂ O ₃) | | |
| OW7 | 6 | - | 33.3 % | - | 66.7 % | - |
| S9 | 9 | - | - | - | 100 % | - |

crack-initiation. Steel batches OW2, OW5, OW7 and S9 only show oxide inclusions according to SEP 1571. The same tendency is seen in Table 19 for steel batches OW2, OW5 and S9. However, in steel batch OW7 most of the crack-initiating non-metallic inclusions were calcium sulfide inclusions of inclusion type D_{sulf} . Steel batches OW3 and OW4 show both sulfide and oxide inclusion types in Figure 9. The crack-initiating non-metallic inclusions are also both sulfide and oxide inclusion. However, in steel batch OW4 most of the inclusions also show proportions of calcium. In steel batch OW3 manganese sulfide inclusions (type A), aluminum oxide (type B and D), calcium sulfide (type D_{sulf}) and mixed inclusions ($\text{CaS}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$) are responsible for the crack initiation. Except for steel batch OW7, a good correlation can be drawn between the inclusion types according to SEP 1571 and the crack-initiating non-metallic inclusions of the experimental investigations. The difference in steel batch OW7 could be based on the fact that both oxide inclusions of type D and sulfide inclusions of type D_{sulf} have a globular shape. When determining the inclusion type according to SEP 1571, the inclusion type is determined according to shape and gray value. It could be that the threshold of the gray value was not exactly matched to the material and thus the calcium sulfide inclusions of type D_{sulf} were evaluated as oxide inclusions of type D.

- **Comparison to ISO 4967, Method A [21] (see Table 14):** There is good agreement between the values determined for inclusion types according to ISO 4967, Method A and the crack-initiating inclusions. Only steel batch OW4 shows that a high proportion of manganese sulfides (type A) was determined according to ISO 4967, method A, but this is not reflected in the crack-initiating inclusions. However, small proportions of calcium are present in all of these as manganese sulfide categorized inclusions in steel batch OW4. It can be concluded that the manganese sulfide inclusions have been appropriately bound by the calcium treatment.

9 Summary

Fisheye failures due to non-metallic inclusions can lead to the reduced endurance fatigue limit of case-hardened, shot-peened gears. Various approaches for preventing crack initiation at non-metallic inclusions are conceivable. Crack initiation at a non-metallic inclusion depends, among other things, on the bond of the non-metallic inclusion to the steel matrix.

Ultra-clean gear steels were investigated in a gear research project [6]. For each steel batch, different measures were taken during steel production to avoid or bind off non-metallic inclusions in order to reduce or even suppress the harmful effect of the non-metallic inclusions. However, the influence of the measures taken on the chemical composition of non-metallic inclusions in these ultra-clean gear steels is not known yet. Therefore, in the framework

jedoch für die Rissauslösung nicht entscheidend. Die Stahlchargen OW2, OW5, OW7 und S9 weisen nur Oxideinschlüsse gemäß SEP 1571 auf. Die gleiche Tendenz ist in Tabelle 19 für die Stahlchargen OW2, OW5 und S9 zu erkennen. In der Stahlcharge OW7 handelte es sich bei den meisten rissauslösenden nicht-metallischen Einschlüssen jedoch um Calciumsulfid-Einschlüsse des Einschlusstyps D_{sulf} . Die Stahlchargen OW3 und OW4 weisen in Bild 9 sowohl Sulfid- als auch Oxideinschlüsse auf. Bei den rissauslösenden nicht-metallischen Einschlüssen handelt es sich ebenfalls sowohl um Sulfid- als auch um Oxideinschlüsse. In der Stahlcharge OW4 weisen die meisten Einschlüsse jedoch auch Anteile von Calcium auf. In der Stahlcharge OW3 sind Mangansulfideinschlüsse (Typ A), Aluminiumoxid (Typ B und D), Calciumsulfid (Typ D_{sulf}) und gemischte Einschlüsse ($\text{CaS}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$) für die Rissauslösung verantwortlich. Mit Ausnahme der Stahlcharge OW7 lässt sich eine gute Korrelation zwischen den Einschlusstypen nach SEP 1571 und den rissauslösenden nicht-metallischen Einschlüssen der experimentellen Untersuchungen herstellen. Der Unterschied bei der Stahlcharge OW7 könnte darauf beruhen, dass sowohl Oxideinschlüsse vom Typ D als auch Sulfideinschlüsse vom Typ D_{sulf} eine kugelförmige Gestalt haben. Bei der Bestimmung des Einschlusstyps nach SEP 1571 wird der Einschlusstyp nach der Form und dem Grauwert bestimmt. Es könnte sein, dass der Schwellenwert des Grauwerts nicht genau auf den Werkstoff abgestimmt war und daher die Calciumsulfideinschlüsse vom Typ D_{sulf} als Oxideinschlüsse vom Typ D bewertet wurden.

- **Vergleich mit ISO 4967, Methode A [21] (siehe Tabelle 14):** Es besteht eine gute Übereinstimmung zwischen den nach ISO 4967, Methode A ermittelten Werten für die Einschlusstypen und den rissauslösenden Einschlüssen. Lediglich die Stahlcharge OW4 zeigt, dass ein hoher Anteil an Mangansulfiden (Typ A) nach ISO 4967, Methode A, ermittelt wurde, der sich aber nicht in den rissauslösenden Einschlüssen widerspiegelt. Allerdings sind in allen diesen, als Mangansulfid kategorisierten, Einschlüssen in der Stahlcharge OW4 geringe Anteile an Calcium vorhanden. Daraus lässt sich schließen, dass die Mangansulfid-Einschlüsse durch die Calciumbehandlung angemessen gebunden wurden.

9 Zusammenfassung

Bruchlinienversagen durch nicht-metallische Einschlüsse kann zur verminderten Dauerfestigkeit von einsatzgehärteten, kugelgestrahlten Zahnrädern führen. Zur Vermeidung der Rissinitiierung an nicht-metallischen Einschlüssen sind verschiedene Ansätze denkbar. Die Rissinitiierung an einem nicht-metallischen Einschluss hängt u.a. von der Bindung des nicht-metallischen Einschlusses an die Stahlmatrix ab.

In einem Zahnrad-Forschungsvorhaben [6] wurden hochreine Zahnradstähle untersucht. Für jede Stahlcharge wurden bei der Stahlherstellung verschiedene Maßnahmen zur Vermeidung oder Bindung von nicht-metallischen Einschlüssen ergriffen, um die schädliche Wirkung der nicht-metallischen Einschlüsse zu reduzieren oder sogar zu unterdrücken. Der Einfluss der getroffenen Maßnahmen auf die chemische Zusammensetzung der nicht-metallischen Einschlüsse

of this publication, the chemical composition of non-metallic inclusions in ultra-clean gear steels was investigated. Furthermore, a comparison of the chemical analysis with the crack-initiating inclusions from the experimental investigations was performed.

The main findings of this publication are:

- Calcium was added to all steel batches in order to bind off the sulfur and improve the sulfidic degree of cleanliness.
- Magnesium was also added to all steel batches to promote deoxidation and desulfurization and thus also prevent the formation of aluminum oxides and manganese sulfides. This should lead to better oxidic and sulfidic degree of cleanliness.
- Despite the measures taken in steelmaking, all steel batches investigated show fish-eye failures due to a crack initiation at a non-metallic inclusion in the experimental investigations. However, a good correlation between the crack-initiating non-metallic inclusions and the determined inclusions based on the metallographic investigations is present.

Based on the shown correlation between the crack-initiating non-metallic inclusions and the determination of inclusions according to standards, an estimate of the critical inclusion type can be made in the gearbox design process and thus taken into account accordingly in extended model approaches to consider the influence of non-metallic inclusions on tooth root load carrying capacity as shown in *Fuchs et al.* [17, 18].

Acknowledgments

The underlying research work [15] was funded in equal proportions by the Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen e.V. (AiF), the German Federal Ministry of Economic Affairs and Climate Action (BMWK, IGF no. 16662 N) and the Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (FVA). The results presented in this paper were taken from the FVA research project 293 III Späte Zahnfußbrüche/ Reinheitsgrad [15]. More detailed information on the influence of non-metallic inclusions is given in the final report.

The underlying research work [6] was funded in equal proportions by the Forschungsvereinigung der Arbeitsgemeinschaft der Eisen und Metall verarbeitenden Industrie e.V. (AVIF) (A 305 / S 0024/10235/16) and the Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (FVA). The results presented in this paper were taken from the FVA research project 293 IV Späte Zahnfußbrüche/ Reinheitsgrad II [6]. More detailed information on the influence of non-metallic inclusions, especially in the very high cycle range, is given in the final report.

in diesen hochreinen Zahnradstählen ist jedoch noch nicht bekannt. Im Rahmen dieser Veröffentlichung wurde daher die chemische Zusammensetzung von nicht-metallischen Einschlüssen in hochreinen Zahnradstählen untersucht. Außerdem wurde ein Vergleich der chemischen Analyse mit den rissauslösenden Einschlüssen aus den experimentellen Untersuchungen durchgeführt.

Die wichtigsten Ergebnisse dieser Veröffentlichung sind:

- Allen Stahlchargen wurde Calcium zugesetzt, um den Schwefel zu binden und den sulfidischen Reinheitsgrad zu verbessern.
- Magnesium wurde ebenfalls allen Stahlchargen zugesetzt, um die Desoxidation und Entschwefelung zu fördern und damit auch die Bildung von Aluminiumoxiden und Mangansulfiden zu verhindern. Dies sollte zu einem besseren oxidischen und sulfidischen Reinheitsgrad führen.
- Trotz der Maßnahmen in der Stahlherstellung zeigen alle untersuchten Stahlchargen in den experimentellen Untersuchungen Bruchlinienversagen aufgrund einer Rissinitiierung an einem nicht-metallischen Einschluss. Es besteht jedoch eine gute Korrelation zwischen den rissauslösenden nicht-metallischen Einschlüssen und den ermittelten Einschlüssen aus den metallographischen Untersuchungen.

Basierend auf der gezeigten Korrelation zwischen den rissauslösenden nicht-metallischen Einschlüssen und der normgerechten Bestimmung von Einschlüssen kann eine Abschätzung des kritischen Einschlusstyps im Getriebeauslegungsprozess erfolgen und somit in erweiterten Modellansätzen zur Berücksichtigung des Einflusses nicht-metallischer Einschlüsse auf die Zahnfußtragfähigkeit, wie in *Fuchs et al.* [17, 18] gezeigt, entsprechend berücksichtigt werden.

Danksagung

Das zugrundeliegende Forschungsvorhaben [15] wurde zu gleichen Teilen von der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen e.V. (AiF), dem Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK, IGF-Nr. 16662 N) und der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (FVA) gefördert. Die in diesem Beitrag vorgestellten Ergebnisse stammen aus dem FVA-Forschungsvorhaben 293 III „Späte Zahnfußbrüche/ Reinheitsgrad“ [15]. Ausführlichere Informationen zum Einfluss nicht-metallischer Einschlüsse finden sich im Abschlussbericht.

Das zugrundeliegende Forschungsvorhaben [6] wurden zu gleichen Teilen von der Forschungsvereinigung der Arbeitsgemeinschaft der Eisen und Metall verarbeitenden Industrie e.V. (AVIF) (A 305 / S 0024/10235/16) und der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (FVA) gefördert. Die in diesem Beitrag vorgestellten Ergebnisse stammen aus dem FVA-Forschungsvorhaben 293 IV „Späte Zahnfußbrüche/ Reinheitsgrad II“ [6]. Ausführlichere Informationen über den Einfluss nicht-metallischer Einschlüsse, insbesondere Bereich hoher Lastspielzahlen, sind im Abschlussbericht enthalten.

References

1. *Kalpakjian, S.; Schmid, S. R.; Werner, E.*: Werkstofftechnik. 5. Aufl., Pearson Studium, München, 2011. – ISBN: 978-3-86894-006-0
2. *Bargel, H.-J.; Schulze, G.*: Werkstoffkunde. 11. Aufl., Springer Verlag, Berlin, 2012
3. *Lino, R. E.; Marins, Á. M. F.; Marchi, L. A. et al.*: Influence of the chemical composition on steel casting performance. *J. Mater. Res. Tech.* 6 (2017) 1, pp. 50–56, DOI:10.1016/j.jmrt.2016.05.002
4. *Birat, J.-P.*: Steel cleanliness and environmental metallurgy. *Metal. Res. Tech.* 113 (2016) 2, DOI:10.1051/metal/2015050, Free Access
5. *Sharma, M.; Kripak, G.; Prahl, U.; Clausen, B.*: Al-freier Einsatzstahl: Aluminium-freier, niobstabilisierter Einsatzstahl für den Großtriebbau. Abschlussbericht; Forschungsvorhaben Nr. 713 I, Heft 1275, FVA, Frankfurt, 2018
6. *Fuchs, D.; Tobie, T.; Stahl, K.*: Untersuchungen zum Fehlstellenversagen an Zahnradern und deren Einfluss auf die Zahnradtragfähigkeit. Forschungsvorhaben 293 IV, FVA, Frankfurt, 2021
7. *Fuchs, D.; Fiederling, E.; Tobie, T.; Stahl, K.*: Investigations on the hardness and grain size of gears made out of ultra-clean gear steels after case-hardening. *HTM J. Heat Treatm. Mat.* 77 (2022) 1, pp. 53–69, DOI:10.1515/htm-2021-2025
8. *Schurer, S.*: Einfluss nicht-metallischer Einschlüsse in hochreinen Werkstoffen auf die Zahnfußtragfähigkeit. Dissertation, TU München, 2016
9. *Bretl, N. T.*: Einflüsse auf die Zahnfußtragfähigkeit einsatzgehärteter Zahnradern im Bereich hoher Lastspielzahlen. Dissertation, TU München, 2010
10. *Stenico, A.*: Werkstoffmechanische Untersuchungen zur Zahnfußtragfähigkeit einsatzgehärteter Zahnradern. Dissertation, TU München, 2007
11. *Fuchs, D.; Schurer, S.; Tobie, T.; Stahl, K.*: Investigations into non-metallic inclusion crack area characteristics relevant for tooth root fracture damages of case carburized and shot-peened high strength gears of different sizes made of high-quality steels. *Forschung im Ingenieurwesen* 83 (2019) 3, pp. 579–587, DOI:10.1007/s10010-019-00324-x
12. *Bretl, N. T.; Schurer, S.; Tobie, T.; Höhn, B.*: Investigations on Tooth Root Bending Strength of Case Hardened Gears in the Range of High Cycle Fatigue. Technical Paper 13FTM09, AGMA, Alexandria, VA, USA, 2013
13. *Winkler, K. J.; Schurer, S.; Tobie, T.; Stahl, K.*: Investigations on the tooth root bending strength and the fatigue fracture characteristics of case-carburized and shot-peened gears of different sizes. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: J. Mechan. Eng. Sci.* 233 (2019) 21–22, pp. 7338–7349, DOI:10.1177/0954406219841650
14. *Fuchs, D.; Schurer, S.; Tobie, T.; Stahl, K.*: On the determination of the bending fatigue strength in and above the very high cycle fatigue regime of shot-peened gears. *Forschung im Ingenieurwesen* 86 (2022), pp. 81–92, DOI:10.1007/s10010-021-00499-2, Open Access
15. *Schurer, S.; Tobie, T.; Stahl, K.*: Tragfähigkeitsgewinn im Zahnfuß durch hochreine Stähle. FVA, Forschungsvorhaben 293 III, FVA, Frankfurt, 2015
16. *Fuchs, D.; Rommel, S.; Tobie, T.; Stahl, K.; Blum, T.*: Influence of Heating Rate and Soaking Temperature during Case-Hardening on the Hardness and Grain Size of Ultra-Clean Gear Steels. *HTM J. Heat Treatm. Mat.* 76 (2021) 5, pp. 321–339, DOI:10.1515/htm-2021-011
17. *Fuchs, D.; Rommel, S.; Tobie, T.; Stahl, K.*: Fracture analysis of fisheye failures in the tooth root fillet of high-strength gears made out of ultra-clean gear steels. *Forschung im Ingenieurwesen* 85 (2021), pp. 1109–1125, DOI:10.1007/s10010-021-00563-x, Open Access
18. *Fuchs, D.; Schurer, S.; Tobie, T. et al.*: A model approach for considering non-metallic inclusions in the calculation of the local tooth root load-carrying capacity of high-strength gears made of high-quality steels. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: J. Mechan. Eng. Sci.* 661 (2019), pp. 7309–7317, DOI:10.1177/0954406219840676
19. *Fuchs, D.; Tobie, T.; Stahl, K.*: Tooth root bending strength of shot-peened gears made of high-purity steels up to the VHCF range. Fall Technical Meeting, 01.-03.11.2021, Rosemont, Illinois, USA, Curran Associates, Inc., Red Hook, NY, USA, 2021, pp. 309–329 – ISBN: 9781713839477
20. *SEP 157*: Evaluation of inclusions in special steels based on their surface areas. Parts 1–3, VDEh, Stahleisen GmbH, Düsseldorf, 2017
21. *ISO 4967*: Steel-Determination of content of nonmetallic inclusions-Micrographic method using standard diagrams. Beuth Verlag, Berlin, 1998
22. *Fuchs, D.; Tobie, T.; Stahl, K.*: Challenges in the determination of the microscopic degree of cleanliness in ultra-clean gear steels. *J. Iron Steel Res. Inter.* (2022), DOI:10.1007/s42243-021-00730-y, Open Access
23. *DIN EN ISO 683-3*: Für eine Wärmebehandlung bestimmte Stähle, legierte Stähle und Automatenstähle – Teil 3: Einsatzstähle. Beuth Verlag, Berlin, 2019
24. *ISO 6336-5*: 2016-08: Calculation of load capacity of spur and helical gears – part 5: strength and quality of materials. Beuth Verlag, Berlin, 2016
25. *Fuchs, D.; Rommel, S.; Tobie, T. et al.*: In-depth analysis of crack area characteristics of fisheye failures influenced by the multiaxial stress condition in the tooth root fillet of high-strength gears. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: J. Mechan. Eng. Sci.* (2021), 095440622110616, DOI:10.1177/09544062211061674

Bibliography

DOI:10.1515/htm-2022-1004

HTM J. Heat Treatm. Mat.

77 (2022) 2; page 89-111

© 2022 Walter de Gruyter GmbH, Berlin/Boston, Germany

ISSN 1867-2493, e-ISSN 2194-1831