

Beilage Auszug aus [1] Bericht über die Untersuchung des abgebrochenen Achsstummels aus einem polnischen Kesselwagen und Gutachten über die Ursache des Bruches erstellt von Dipl.-Ing. Wolfgang Allertshammer, Allgemein beeideter und gerichtlich zertifizierter Sachverständiger

DIPL.-ING. WOLFGANG ALLERTSHAMMER				
SCHADENSANALYSE METALLISCHER WERKSTOFFE WERKSTOFFBERATUNG GUTACHTEN		KONSULENT ALLGEMEIN BEEIDETER UND GERICHTLICH ZERTIFIZIERTER SACHVERSTÄNDIGER		
Ihr Zeichen	vom	Mein Zeichen G 700/11-1	Datum 20.05.2011	Seite/von 1 / 8
Bericht				
über die Untersuchung des abgebrochenen Achsstummels aus einem polnischen Kesselwagen				
und				
Gutachten				
über die Ursache des Bruches				
Auftraggeber:	Bundesanstalt für Verkehr Unfalluntersuchung Fachbereich Schiene Postfach 207 1000 Wien			
Betreff:	Achsbruch am Wagen: Zacs 33 51 786 7 237-4P Polnischer Kesselwagen, Vorfall 12-2010 BMVIT-795.229_0004-II_BAV_UUB_SCH_2011_09.03.2011			
A-1170 WIEN, LEOPOLD ERNSTGASSE 32/9, TEL. 01 (+43-1) 485 73 35-0, FAX 485 73 35-4 / www.allertshammer.at / Email: wolfgang@allertshammer.at BANK-AUSTRIA CREDITANSTALT Nr.0945 4522500, BLZ 32090, SWIFT (BIC): BKAUATWW, IBAN: AT55 1100 0094 5452 2500, UID: ATU 37647301				



1 Gegenstand der Untersuchung und Auftrag

Gemäß §8 des Unfalluntersuchungsgesetzes 2005 ist die Ursache des Bruches einer Radsatzwelle an einem polnischen Kesselwagen zu klären. Infolge des Bruches der Radsatzwelle entgleiste der Kesselwagens 33 51 786 7 237-4 im Bhf. Wien Zvbf am 9.12.2010 beim Abrollen mit dem vorlaufenden Drehgestell auf einer Weiche und kam nach ca. 50 m zum Stillstand. Der abgebrochene Achsstummel und das dazugehörige Achslager waren bereits zuvor auf der Strecke verblieben und konnten sichergestellt werden.

Der abgebrochene Achsstummel wurde in einem mit Tectyl versiegelten Zustand zur Untersuchung übergeben. Es ist eine Schadensuntersuchung vorzunehmen und dabei die Ursache der Rissbildung nach langer Betriebszeit (Herstellung 1962) zu ermitteln. Für den Auftraggeber ist von besonderem Interesse, ob eine nachträglich auf der Achse angebrachte Entlastungsmulde mit etwa 0,1 mm Tiefe als Ursache in Frage kommen kann.

Zusätzlich zum Schadensteil wurde eine „Radsatzbefundung“ der ÖBB, Technische Services GmbH vom 31.01.2011 zur Verfügung gestellt, in welcher der Unfallhergang geschildert wird und eine Dokumentation aller Radsätze des Wagens enthalten ist. Aus der vorliegenden Dokumentation ist zu entnehmen, dass der Radsatz im Jahr 1962 gefertigt wurde, die Entlastungsmulde jedoch zu einem späteren Zeitpunkt angebracht worden ist. Vom Auftraggeber wurde weiter eine Sammlung von Daten und Normanforderungen zusammengestellt, die in Form eines word-Dokumentes ebenfalls zur Verfügung gestellt worden sind.

Gemäß § 5, leg. cit. hat die Untersuchung als ausschließliches Ziel die Feststellung der Ursache des Vorfalles, um Sicherheitsempfehlungen ausarbeiten zu können, die zur Vermeidung gleichartiger Vorfälle beitragen können; die Untersuchung zielt nicht darauf ab, die Schuld- oder Haftungsfrage zu klären.

2 Visueller Befund

Der zur Untersuchung übergebene Achsstummel mit etwa 160 mm Länge und einem Durchmesser von 120,0 mm ist nach dem Bruch unversehrt und ohne Beschädigung der Bruchfläche erhalten geblieben; er wurde komplett in Tectyl versiegelt übergeben (siehe Bild 1, Beilage 1). Bereits in diesem Zustand und besser nach umfangreicher Reinigung in Lösungsmittel, zeigt sich ein einseitig ausgehender Schwingbruch mit sehr vielen Rastlinien und nur einem geringen Restbruchanteil von etwa 15 %.

Makroskopisch gesehen entspricht das Bild einem typischen Bruch durch Umlaufbiegung bei geringer Nennspannung. Unter einer Lupe und entsprechender Beleuchtung ist aber zu erkennen, dass der Schwingbruch von einer sehr lokalen Spannkonzentration quasi punktförmig ausgeht und zunächst einen halbkreisförmigen Riss erzeugt, bevor er in die übliche Konfiguration übergeht (siehe Bilder 2 bis 5, Beilagen 1 bis 3).

Der Riss hat sich direkt unter dem Lagersitz in dessen Randbereich gebildet. Im Mikroskop ist zu erkennen, dass sich am Bruchausgang eine rissige und verquetschte Oberflächenstruktur auf

DIPL.-ING. WOLFGANG ALLERTSHAMMER



Mein Zeichen
G 700/11-1

Datum
20.05.2011

Seite/von
3 / 8

der Wellenoberfläche gebildet hat (siehe Bild 4, Beilage 2), etwa 15 mm seitlich davon ist eine weitere Stelle vorhanden, an der neben einer aufgerauten Oberfläche bereits ein kleiner Nebenriss erkennbar ist (siehe Bild 6, Beilage 3).

Die gesamte Oberfläche des angrenzenden Lagersitzes wirkt fleckig und ist mit einer sehr wechselnden Oberflächenstruktur versehen, in welcher die ursprünglichen Drehriefen nur mehr an wenigen Stellen rudimentär zu erkennen sind (siehe Bilder 7 und 8, Beilage 4). Erst etwa 40 mm seitlich des Rissausganges lässt sich die zu einem späteren Zeitpunkt eingedrehte Entlastungsmulde erkennen, da der Bruch hier erst in diesen Bereich hineinläuft (siehe Bild 8 und 9, Beilagen 4 und 5). Die eingedrehte Mulde ist deutlich von der angrenzenden Oberfläche des Lagersitzes zu unterscheiden, da sie im Unterschied zu dieser eine eindeutige Bearbeitungsstruktur mit Riefen aufweist.

Die Oberfläche des Lagersitzes weist gerade im Rissausgangsbereich eine weitgehend eingebnete Oberfläche auf, in welcher Drehriefen maximal als geringe Reststruktur erkennbar sind. Verschiedentlich haben sich in Umfangsrichtung laufende Vertiefungen gebildet und anschließende Oberflächen weisen eine aufgeraute und narbige Oberfläche auf, an der bereits sämtliche Merkmale einer Bearbeitung fehlen. Über die gesamte Oberfläche verteilt sind einzelne Druckstellen ausgebildet, die durch das Einpressen harter Partikel entstanden sein müssen (siehe Bilder 10 bis 12, Beilagen 5 und 6). Die Oberflächenstruktur bleibt auf der gesamten Oberfläche ähnlich, wobei an manchen Stellen der Eindruck entsteht, dass die Oberfläche händisch mit Schleifpapier nachbearbeitet worden ist (siehe Bild 11, Beilage 6).

Da die feinen Details der Oberflächenstruktur lichtoptisch nicht mehr auflösbar sind, erfolgt die weitere Untersuchung des Rissausgangsbereiches und der angrenzenden Wellenoberfläche im Rasterelektronenmikroskop.

3 Rasterelektronenmikroskop

Das Rasterelektronenmikroskop ermöglicht die Abbildung von Ober- und Bruchflächen mit einer Schärfentiefe, die zumindest 100-fach über jener des Lichtmikroskopes liegt. Abgesehen davon sind in der Vergrößerung keine optischen Grenzen gesetzt. Aus diesem Grund eignet sich das Gerät bestens zur Untersuchung von Bruchvorgängen. Die Untersuchung erfolgte im Rasterelektronenmikroskop (REM) des Instituts für Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnologie der TU Wien (Philips XL-30, 20 kV Beschleunigungsspannung)

An der Rissausgangsstelle finden sich zahlreiche kleine Nebenrisse, die mit mehreren kleinen Druckstellen kombiniert auftreten (siehe Bilder 13 bis 15, Beilagen 7 und 8). Zwei Fotos wurden gedreht, um der Blickrichtung der lichtoptischen Bilder zu entsprechen. Hinweise auf eingepresstes Fremdmaterial sind nicht zu finden, da die Struktur der Oberfläche trotz der Risse homogen wirkt. Bei höherer Vergrößerung ist die Oberfläche örtlich mit spröden Rissen übersät, was auf gebrochene Oxidschichten hindeutet (siehe Bild 16, Beilage 8).

DIPL.-ING. WOLFGANG ALLERTSHAMMER



Mein Zeichen
G 700/11-1

Datum
20.05.2011

Seite/von
4 / 8

Der bereits lichtoptisch deutlich wahrnehmbare Nebenriss, der an einer Druckstelle, etwa 15 mm neben dem Bruchausgang aufgefallen ist, zeigt im Rasterelektronenmikroskop das typische Erscheinungsbild von Schwingungsreibverschleiß (siehe Bild 17, Beilage 9). Die angrenzende Oberfläche ist unterschiedlich verquetscht und verrieben und weist neben kleinen Druckstellen wellenförmige Oberflächenstrukturen auf. Etwa 2 mm unterhalb des Rissausgangs (in axialer Richtung) wechseln in Umfangsrichtung verlaufende Riefen mit einer stark verriebenen und teilweise geglätteten Struktur (siehe Bilder 18 und 19, Beilagen 9 und 10). Die Riefen verlaufen allerdings nicht wie maschinell entstandene Schleif- oder Drehriefen exakt in Umfangsrichtung, sondern weisen mehrfach auch etwas wechselnde Orientierung auf, was für eine Nachbearbeitung mittels Schleifpapier von Hand spricht.

Etwa 14 mm unterhalb des Rissausgangs beginnt eine vollständig verriebene Oberfläche, in der gar keine Bearbeitungsspuren mehr erkennbar sind (siehe Bild 3, Beilage 2). Im Rasterelektronenmikroskop wirkt diese Oberfläche stark aufgeraut und mit Belägen überzogen, die manchmal schichtweise abblättern. Mit höher werdender Vergrößerung erscheinen zusätzlich kleine, kugelförmige Partikel, die in Haufen fest an der Oberfläche haften (siehe Bilder 20 bis 22, Beilagen 10 und 11). In der Mikroanalyse werden ausschließlich die Elemente des Werkstoffs angezeigt; es handelt sich also um verriebene und teilweise oxidierte Partikel aus dem Werkstoff (siehe Bild 23, Beilage 12). Die nachträglich eingearbeitete Entlastungsmulde, die seitlich, neben dem Rissausgang noch am Bruchteil vorhanden ist, zeigt eine unveränderte Schleifriefenstruktur und hebt sich damit deutlich von der Oberfläche des Lagersitzes ab (siehe Bild 24, Beilage 12).

4 Metallographische Untersuchung

Metallographische Schliffe wurden direkt über den Bruchausgang und in der daneben liegenden Zone mit Nebenriss gelegt (siehe Bilder 3, 4 und 25, Beilagen 2 und 13). Zum Vergleich wurde in der stark verriebenen Zone auch ein Schliff in Umfangsrichtung, also parallel zur Bruchfläche gelegt. Seitlich, etwa 70 mm vom Bruchausgang entfernt, wurden die Schliffe 7 und 8 entnommen, da hier noch ein Teil der Entlastungsmulde vorhanden ist (siehe Bild 26, Beilage 13).

Die Welle besteht aus Stahl mit ferritisch-perlitischem Gefüge, mit einem Gefügeanteil von jeweils 50 %. Direkt am Bruchausgang weist der Ferrit in Oberflächennähe sehr starke Substrukturen auf, was ein aufgerautes und dunkles Erscheinungsbild des sonst hellen Ferrits bewirkt hat (siehe Bilder 27 bis 29, Beilagen 14 und 15). Neben dem Rissausgang haben sich auch mehrere Nebenrisse gebildet, die fast immer in schräger Richtung verlaufen.

Derselbe Schliff 2 zeigt in einer Entfernung von etwa 15 mm vom Rissausgang das unveränderte Ferrit-Perlit-Gefüge ohne Substrukturen (siehe Bilder 30 und 31, Beilagen 15 und 16). Die hier vorhandene, verriebene Zone hat einen hellen, weitgehend strukturlosen Belag erzeugt, der sich mit globularen Anteilen mischt und manchmal auch ausschließlich aus solchen besteht. Unterhalb dieser Zone wirkt das Gefüge unverändert.

DIPL.-ING. WOLFGANG ALLERTSHAMMER



Matr. Zeichen
G 700/11-1

Datum
20.05.2011

Seite/von
5 / 8

Auch der Schliff 3 durch die weitere verquetschte Zone, die sich neben dem Rissausgang gebildet hat, zeigt in gleicher Art und Weise Nebenrisse und eine hohe Versetzungsdichte im Ferrit (siehe Bild 32, Beilage 16). Der direkt dahinter entnommene Querschliff liegt voll in der verriebenen Zone der Oberfläche, weshalb nicht verwundert, dass die gesamte Oberfläche mit einer hellen Schicht überzogen ist, die einen hohen Anteil globulare Strukturen enthält (siehe Bilder 33 und 34, Beilage 17). Die Schicht ist örtlich bis zu 25 µm dick und darunter sind örtlich wenig tiefegehende, plastische Verformungen erkennbar.

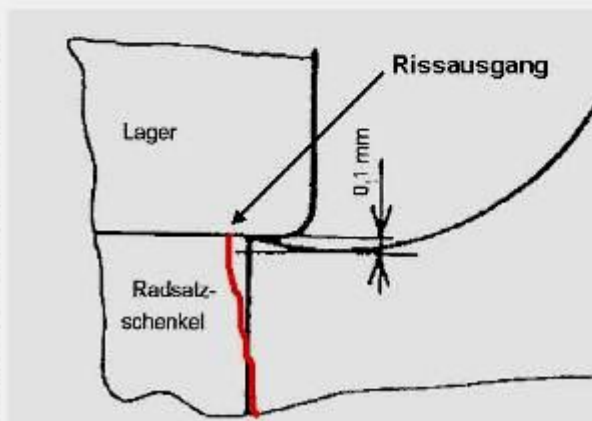
Auch die seitlich entnommenen Schliffe 7 und 8 zeigen an der Lagersitzfläche ein ähnliches Aussehen. Außerhalb davon aber im Bereich der eingearbeiteten Entlastungsmulde ist eine Struktur von Schleifriefen ausgebildet, die auch direkt unter der Oberfläche keine plastischen Verformungen erkennen lässt (siehe Bilder 35 und 36, Beilage 18). Gefüge und Oberflächenstruktur sind daher einwandfrei.

5 Gutachten

5.1 Interpretation wesentlicher Ergebnisse

Der Bruch hat makroskopisch das typische Aussehen eines Bruches zufolge Umlaufbiegung mit geringer Nennbelastung, da der Restgewaltbruch nur etwa 15 % der Bruchfläche ausmacht. Am Rissausgang hat sich zunächst von einem kleinen, punktförmigen Bereich eine halbkreisförmige Anrisslinse gebildet, was nur durch ein sehr lokales Spannungsfeld erklärt werden kann, welches an dieser Stelle gewirkt hat. Der Riss breitet sich über einen langen Zeitraum langsam aus, was an hundertten, in sehr regelmäßigen Abständen folgenden Rastlinien und einer durchgehend relativ glatten Bruchfläche abzuleiten ist. Erst im letzten Drittel wird die Bruchstruktur deutlich rauer, was mit einem zunehmend rascherem Rissfortschritt gleichzusetzen ist.

Der Rissausgang liegt am Rand, aber noch unterhalb des Lagersitzes und somit eindeutig nicht im Bereich der erst nachträglich eingebrachten Entlastungsmulde (siehe Skizze rechts). Erst im Rasterelektronenmikroskop ist zu erkennen, dass die am Bruchausgang aufgeraute Oberfläche des Lagersitzes durch örtliche Druckstellen und Mikrorissbildung zu erklären ist und dass entgegen des ersten Eindrucks kein Fremdmaterial eingepresst wurde. Dieser Befund wurde auch in der metallographischen Untersuchung bestätigt.



DIPL.-ING. WOLFGANG ALLERTSHAMMER

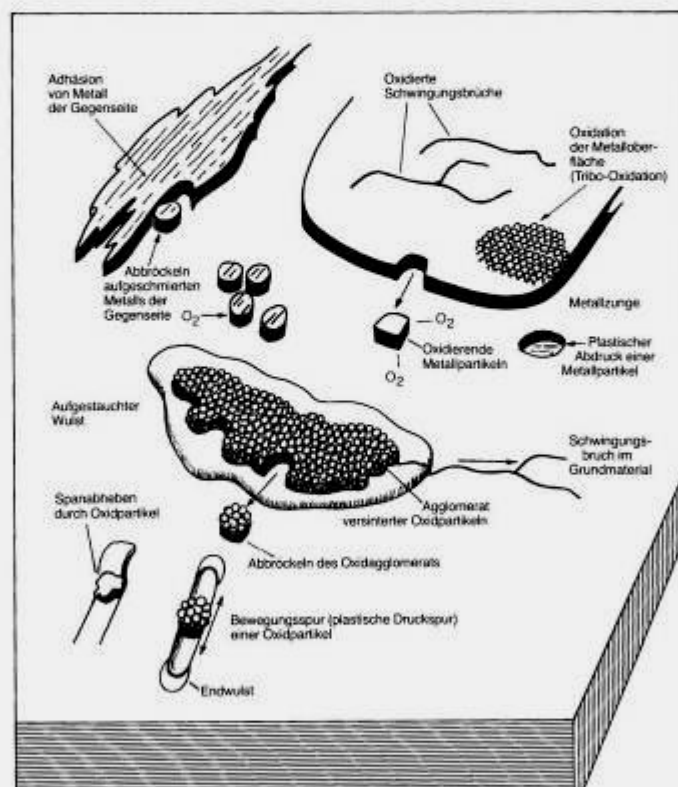


Mein Zeichen
G 700/11-1

Datum
20.05.2011

Seite/von
6 / 8

Durch die Untersuchung der an den Rissaussgang angrenzenden Wellenoberfläche konnte klar gezeigt werden, dass die aufgerauten Oberflächenbereiche, in denen keine Bearbeitungsspuren mehr vorhanden sind, durch Schwingungsreibverschleiß oder sogenanntes „Fretting“ entstanden sind. Es handelt sich dabei um eine Schädigungsform, die der Reibkorrosion ähnlich ist, bei der aber der Reibverschleiß zufolge schwingender Relativbewegung überwiegt. Die betroffenen Oberflächen sind aufgeraut mit flachen Überlappungen, die sowohl metallischer, als auch oxidischer Struktur sein können und auf der gesamten Oberfläche finden sich globulare Strukturen mit Durchmessern von 2 bis 5 μm (siehe Bilder 20 bis 22, Beilage 10 und 11). Die Schädigungsstruktur wurde von Engel und Klingele in der unten wiedergegebenen Graphik dargestellt. [Lothar Engel, Hermann Klingele; Rasterelektronenmikroskopische Untersuchung von Metallschäden; Carl Hanser Verlag 1982]



Diese Schädigungsform ist nur möglich, wenn es zu einer Relativbewegung zwischen Welle und Lagerinnenring kommt, was an sich durch geeignete Gestaltung der Sitzflächen vermieden werden sollte. Da nur eine der beiden Flächen zur Verfügung steht, können möglicherweise nicht alle auslösenden Faktoren nachvollzogen werden.

Der Wellensitz wird nach UIC 510-1, 9. Auflage vom 1. Jänner 1978 (siehe Datensammlung des Auftraggebers: Beweisstücke.doc), mit DM 120 p6 angegeben, was einem



Mein Zeichen
G 700/11-1

Datum
20.05.2011

Seite/von
7 / 8

Wellendurchmesser von 120,037 bis 120,060 mm entspricht. Von Herrn Ing. Piringer, Bundesanstalt für Verkehr, Unfalluntersuchungsstelle des Bundes, erhielt ich zusätzlich noch die Information, dass auch Wellen mit Radsatzschenkel $DM = 120\ n6 = 120,023$ bis 120,045 mm in Gebrauch sind und der DM des Lagerinnenringes den Toleranzbereich 119,980 bis 120,003 mm aufweist. Er entspricht damit nicht der sogenannten Einheitsbohrung H6, die eine Toleranz 120,000 bis 120,022 mm aufweisen würde.

Daraus folgt, dass das Lager jedenfalls einen sogenannten „festen Sitz“ aufweisen hätte müssen, was nachweislich nicht der Fall war. Mit der Genauigkeit einer Schiebelehre konnte ein Durchmesser von 120,0 mm ermittelt werden und zusätzlich waren auch an keiner Stelle des Lagersitzes übliche, maschinelle Bearbeitungsriefen der Oberfläche unverändert vorhanden. Die ursprünglichen Drehriefen der Fertigung sind zwar in ihrer Makrostruktur noch erkennbar, doch handelt es sich dabei nur um Reststrukturen in Vertiefungen (siehe Bilder 7 bis 12, Beilagen 4 bis 6).

5.2 Schadensentwicklung

Der Darstellung ist voranzustellen, dass nur ein Teil von zwei Reibverschleißpartnern untersucht werden konnte und hier eine gewisse Unsicherheit verbleibt. Unter Zugrundelegung üblicher Daten ist aber davon auszugehen, dass der Lagerinnenring aus gehärtetem Kugellagerstahl bestehen sollte und an dieser Seite daher wenig Veränderungen in der Oberfläche erfolgen können.

Unter der Voraussetzung eines Lagerinnenringes aus Kugellagerstahl und mit den oben angeführten Toleranzlagen des Innendurchmessers und der Welle müsste zumindest ein leichter Presssitz gegeben sein, was nachweislich nicht der Fall war. Eine Vergrößerung des Lagerinnendurchmessers könnte durch ein Warmlaufen des Lagers aufgetreten sein. Es fällt aber auf, dass beim Abpressen des Lagersitzes von der Welle keine Riefen in axialer Richtung entstanden sind. Die Frage der tatsächlich gegebenen Toleranzlage lässt sich somit nicht mehr eindeutig klären, da einer der Partner fehlt.

Der Schadenshergang lässt sich aber trotzdem weitgehend rekonstruieren: Die Relativbewegung zwischen den Teilen ist durch die Untersuchung nachgewiesen. Die zyklischen Verschiebungsbewegungen haben zu dem typischen Schadensbild von Schwingungsreibverschleiß geführt und damit gehen auch nachvollziehbar Transportvorgänge von Werkstoffpartikeln an der Oberfläche einher. Sie verursachen durch die zusätzlich ablaufenden Oxidationsvorgänge, örtlich feste Krusten und an anderen Stelle Materialverlust. In der Folge treten Lastumlagerungen ein und die relativ gleichmäßige Kraftübertragung zwischen den Oberflächen geht in eine Lastübertragung an nur einzelnen Druckstellen auf der Sitzfläche über. Durch das Einbringen harter Fremdpartikel zwischen den Oberflächen kann die Schädigung noch verstärkt werden.

Kleine, lokal wirksame Druckstellen wurden direkt am Rissausgang der Welle nachgewiesen, wodurch sich auch die Lage des Rissausgangs erklärt. Warum sich die Druckstelle gerade hier gebildet hat, kann nur allgemein so beantwortet werden, dass der Randbereich aufgrund der

DIPL.-ING. WOLFGANG ALLERTSHAMMER



Mein Zeichen
G 700/11-1

Datum
20.05.2011

Seite/von
8 / 8

Biegebelastung einer Welle höher belastet wird und bei Umlaufbiegung hier auch die größten Lateralverschiebungen auftreten.

Die Entstehung des Bruches konnte daher generell geklärt werden, da jedoch mehrere Parameter offen und keiner weiteren Überprüfung zugänglich sind, können zusammenfassend, ohne Anspruch auf Vollständigkeit, folgende mögliche Ursachen genannt werden:

- Fehler in der Toleranz zwischen Welle und Lagerinnenring,
- Überhitzung des Lagers im Betrieb mit entsprechender Wärmedehnung im Lager,
- unzulässige Nacharbeit der Welle beim Austausch des Lagers, was zu einer Verringerung des Durchmessers geführt hat.

Das nachträgliche Einbringen der Entlastungsmulde, wie sie nach UIC 515-3 vorgesehen ist, hat keinen Einfluss auf die Entstehung des Bruches gehabt.

Der Bericht wurde auf Wunsch des Auftraggebers auch in elektronischer Form erstellt und enthält in dieser Form daher keine Unterschrift. Die Prüfergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die untersuchten Proben. Die Schlussfolgerungen resultieren aus den mir zur Verfügung gestellten Unterlagen und den Untersuchungsergebnissen. Sollten wesentliche zusätzliche Fakten bekannt werden, so behalte ich mir eine entsprechende Neubewertung vor.



Dipl.-Ing. W. Allertshammer eh.

DIPL.-ING. WOLFGANG ALLERTSHAMMER



Mein Zeichen
G 700/11-2

Datum
20.05.2011

Beilage von
1 / 18



Bild 1:
Wellenstummel im ungereinigten Anlieferungszustand, versiegelt mit Tectyl



Bild 2:
Bruchfläche nach dem Trennen und der Reinigung; Schwingbruch mit deutlichen
Rastlinien und lokalem, beinahe punktförmigem Rissausgang (siehe Pfeil)

V = 2 : 1

DIPL.-ING. WOLFGANG ALLERTSHAMMER



Mein Zeichen
G 700/11-2

Datum
20.05.2011

Beilage/von
2 / 18

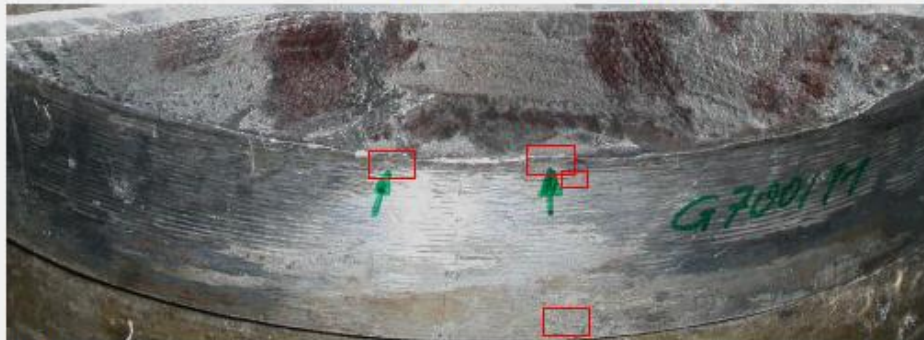


Bild 3: V = 2 : 1
Detail des Rissausgangsbereiches; die grünen Pfeile markieren Fehlstellen in der Wellenoberfläche wobei der Rissausgang beim rechten Pfeil liegt. Die roten Rechtecke markieren die im Rasterelektronenmikroskop dargestellten Bereiche (siehe Bilder 13 bis 22).



Bild 4: V = 7 : 1
Detail des Rissausgangsbereiches; die grünen Pfeile markieren Fehlstellen in der Wellenoberfläche; die angrenzende Wellenoberfläche lässt nur noch Reste von Drehriefen erkennen; unterschiedliche Riefen und verriebene Stellen im gesamten Bereich

DIPL.-ING. WOLFGANG ALLERTSHAMMER



Mein Zeichen
G 700/11-2

Datum
20.05.2011

Beilage von
3 / 18

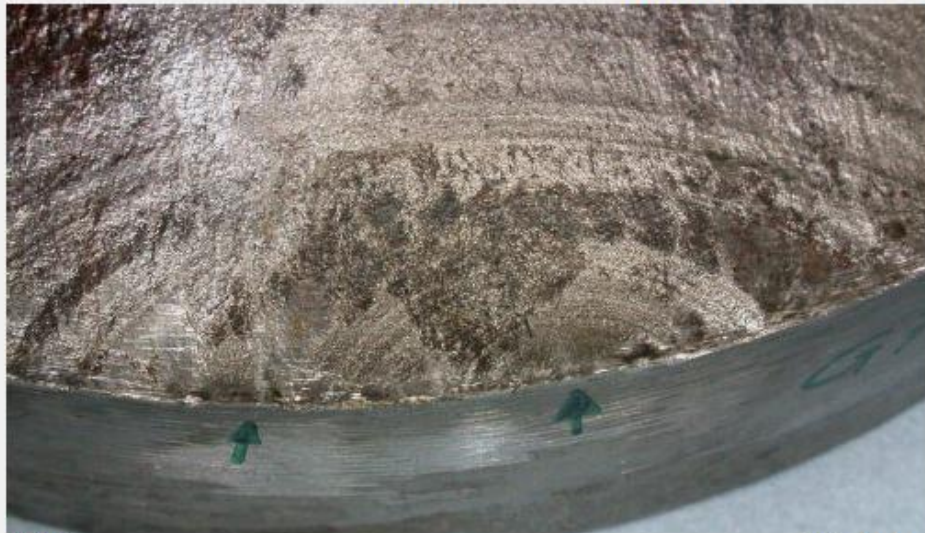


Bild 5: V = 4 : 1
Detail des Rissausgangsbereiches in einer Beleuchtung, welche die Rastlinien am Bruchausgang gut erkennen lässt; der Anriss hatte zunächst eine halbkreisförmige Kontur



Bild 6: V = 7 : 1
weitere aufgeraute Stelle neben dem Rissausgang, hier ist deutlich ein Nebenriss zu erkennen (siehe linker Pfeil in Bild 5)

DIPL.-ING. WOLFGANG ALLERTSHAMMER



Mein Zeichen
G 700/11-2

Datum
20.05.2011

Beilage von
4 / 18



Bild 7:
Oberfläche nach Entfernung der Tectylschicht; rechts bereits abgetrennter
Rissausgangsbereich



Bild 8:
Lagersitzoberfläche in der Nähe des Rissausgangs (siehe Pfeil); die strichlierte Linie rechts
markiert den Beginn der Entlastungsmulde

DIPL.-ING. WOLFGANG ALLERTSHAMMER



Mein Zeichen
G 700/11-2

Datum
20.05.2011

Beilage von
5 / 18



Bild 9:
Oberfläche des Lagersitzes mit angrenzender Entlastungsmulde (oben), die an ihren gleichmäßigen Schleifriefen zu erkennen ist



Bild 10:
Lagersitzoberfläche an der Außenseite (Wellenende) mit eingepressten Fremdstoffen

DIPL.-ING. WOLFGANG ALLERTSHAMMER



Mein Zeichen
G 700/11-2

Datum
20.05.2011

Beilage von
6 / 18



Bild 11:
Eindruckstelle von Fremdpartikeln



Bild 12:
weitere Eindruckstelle von Fremdpartikeln

DIPL.-ING. WOLFGANG ALLERTSHAMMER



Mein Zeichen
G 700/11-2

Datum
20.05.2011

Beilage/von
7 / 18

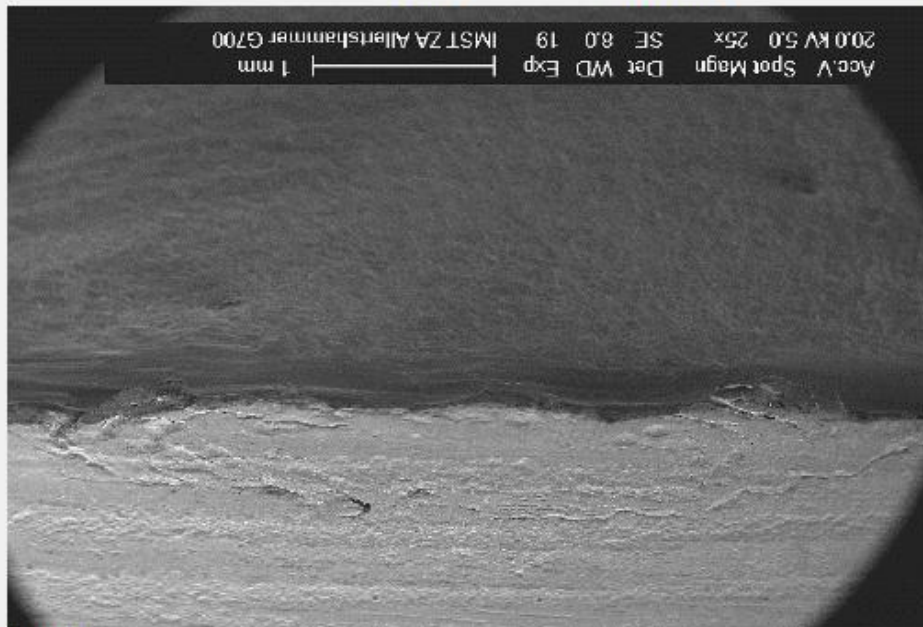


Bild 13:
Rissausgangsbereich im Rasterelektronenmikroskop, Schrägansicht; Druckstelle mit
Nebenrissen (Bild gedreht entsprechend Bild 4)

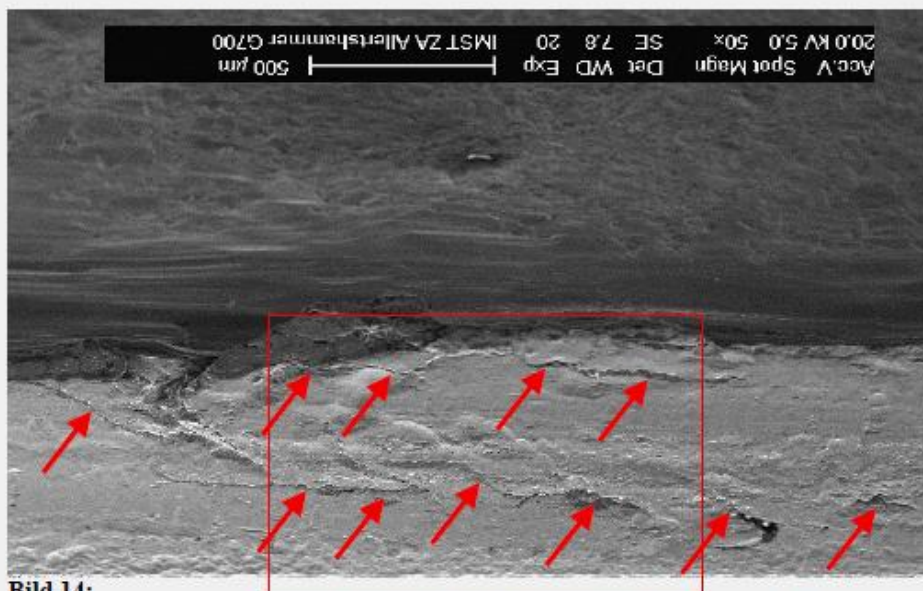


Bild 14:
Rissausgangsbereich, Detail; deutlich sind Eindellungen und Nebenrisse zu erkennen
(siehe Pfeile)

DIPL.-ING. WOLFGANG ALLERTSHAMMER



Mein Zeichen
G 700/11-2

Datum
20.05.2011

Beilage/von
8 / 18

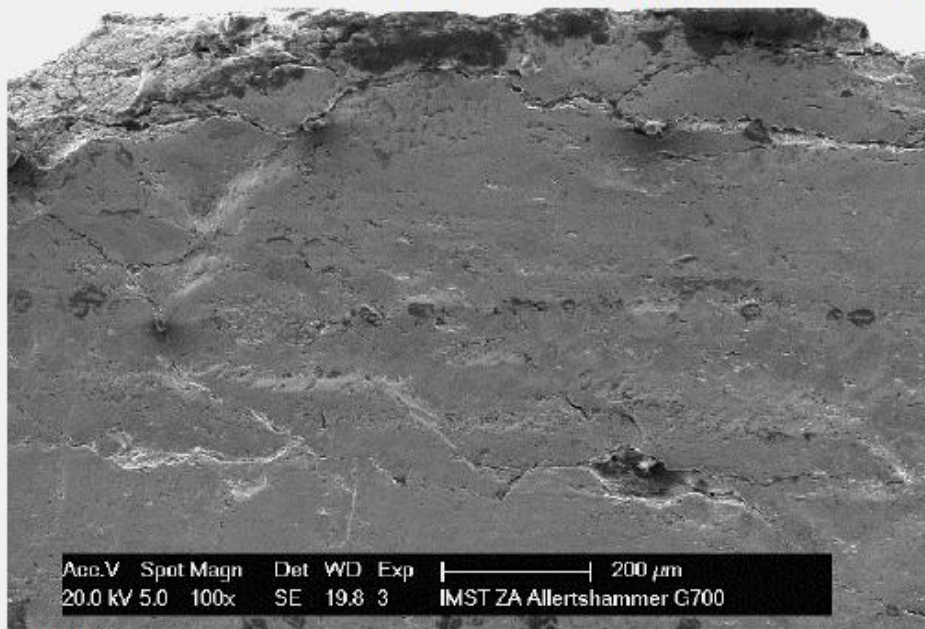


Bild 15:
Rissausgangsbereich, Detail aus Bild 14

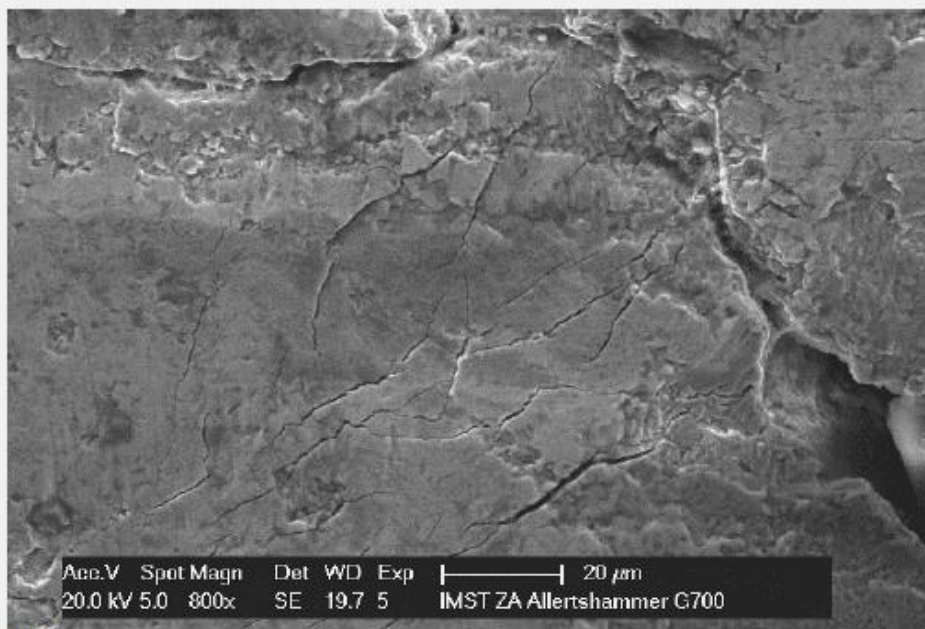


Bild 16:
Detail mit spröden Rissen in der Oberfläche, Risse in der Oxidschicht

DIPL.-ING. WOLFGANG ALLERTSHAMMER



Mein Zeichen
G 700/11-2

Datum
20.05.2011

Beilage von
9 / 18

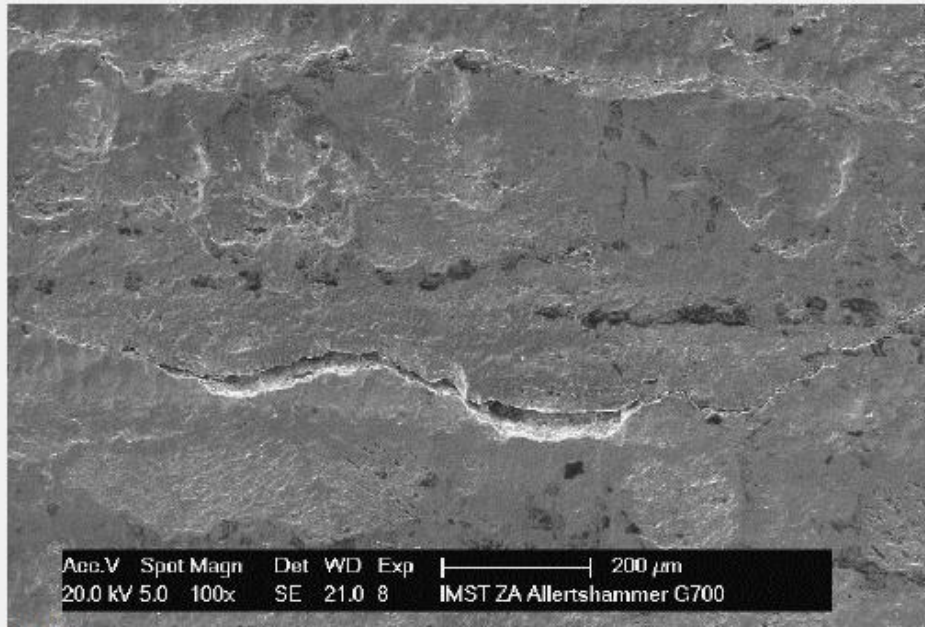


Bild 17:
weitere Druckstelle mit Nebenrissbildung; typische Rissbildung für
Schwingungsreibverschleiß (siehe Bild 4 links)

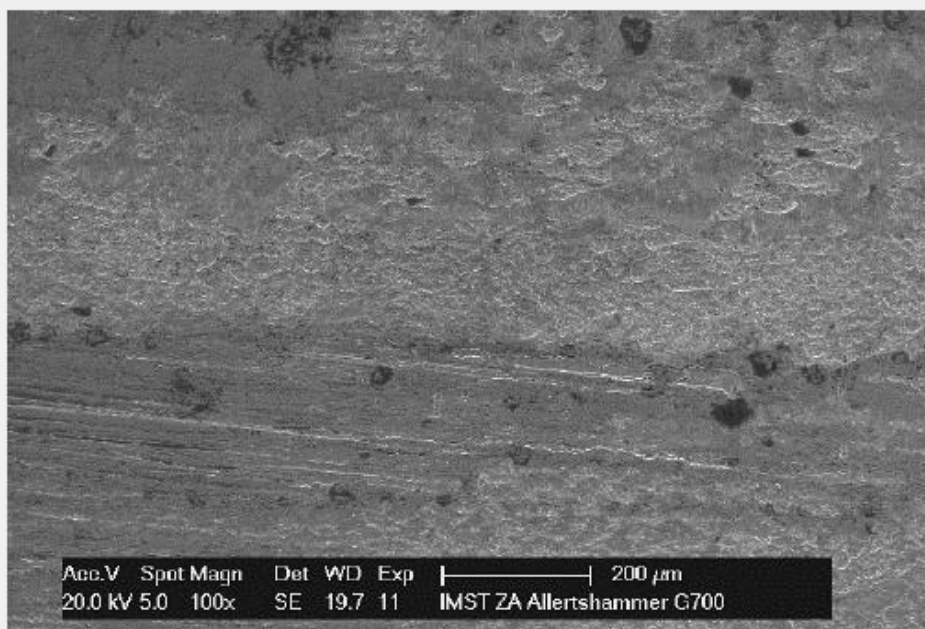


Bild 18:
Schwingungsreibverschleiß direkt unterhalb des Rissausgangs

DIPL.-ING. WOLFGANG ALLERTSHAMMER



Mein Zeichen
G 700/11-2

Datum
20.05.2011

Beilage/von
10 / 18

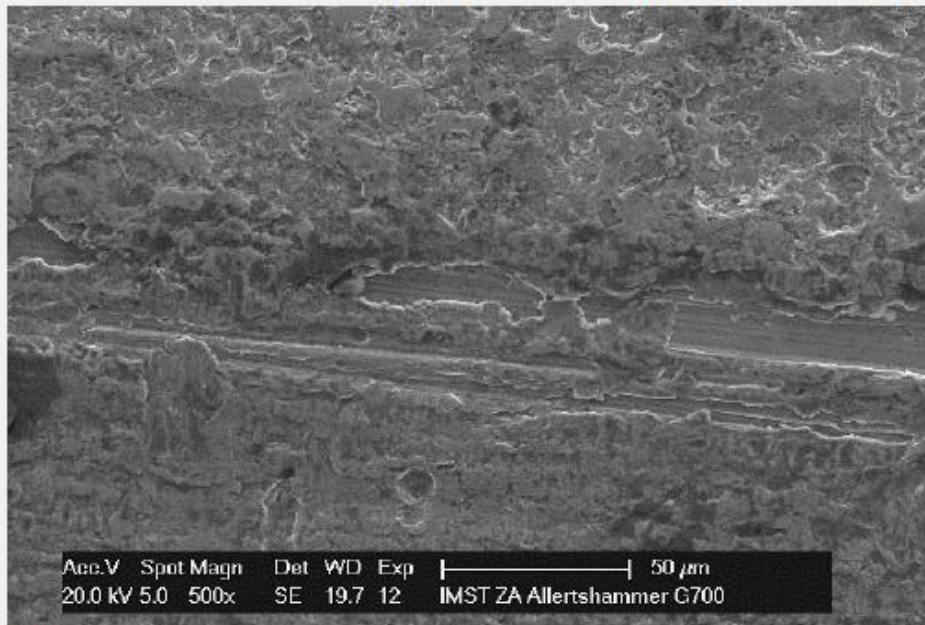


Bild 19:
Schwingungsreibverschleiß direkt unterhalb des Rissausgangs im Detail

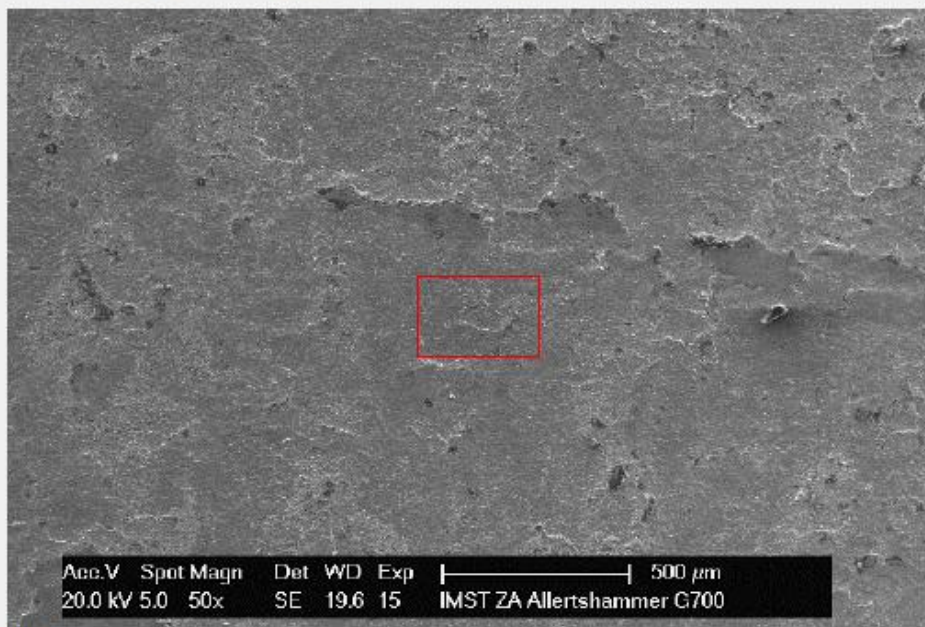


Bild 20:
Schwingungsreibverschleiß etwa 15 mm hinter dem Rissausgang; keine
Bearbeitungsstruktur mehr vorhanden

DIPL.-ING. WOLFGANG ALLERTSHAMMER



Mein Zeichen
G 700/11-2

Datum
20.05.2011

Beilage von
11 / 18

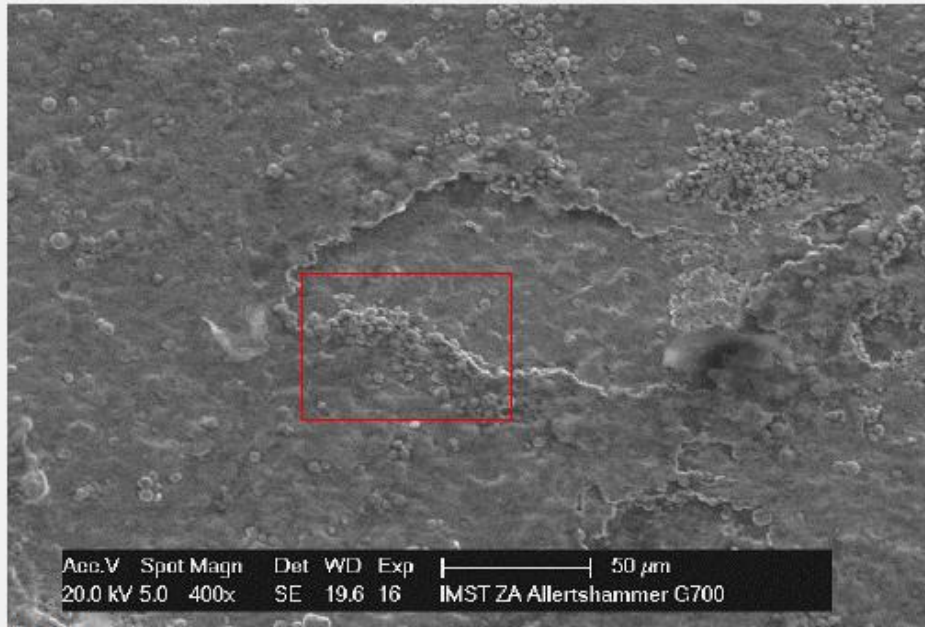


Bild 21:
Schwingungsreibverschleiß etwa 15 mm hinter dem Rissausgang; aufgeraute Oberfläche mit kleinen, kugelartigen Strukturen

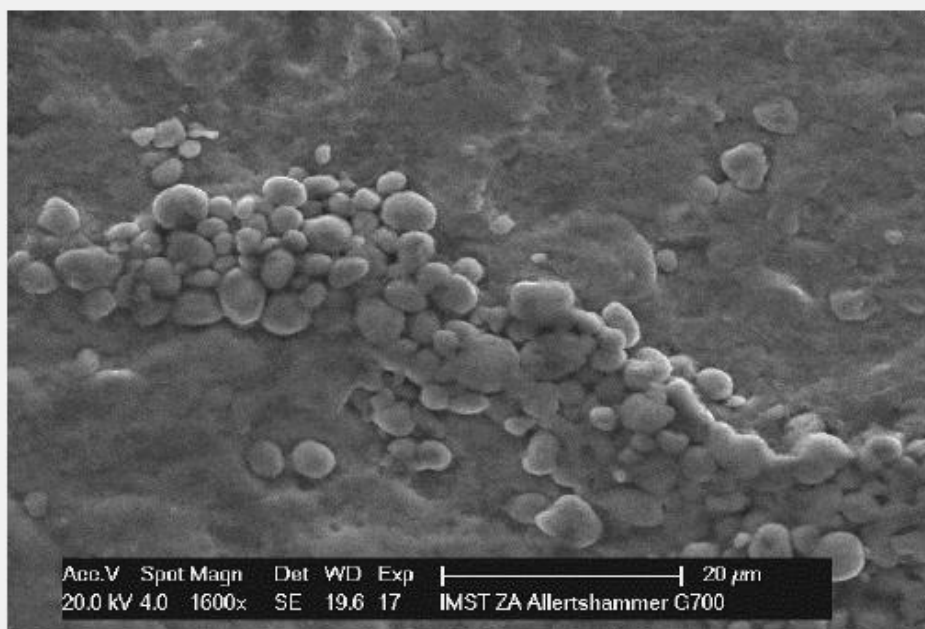


Bild 22:
Schwingungsreibverschleiß etwa 15 mm hinter dem Rissausgang; Detail der kugelartigen Struktur in Bild 21

DIPL.-ING. WOLFGANG ALLERTSHAMMER



Mein Zeichen
G 700/11-2

Datum
20.05.2011

Beilage von
12 / 18

Label A: G700: 18: Welle seHA 18x5

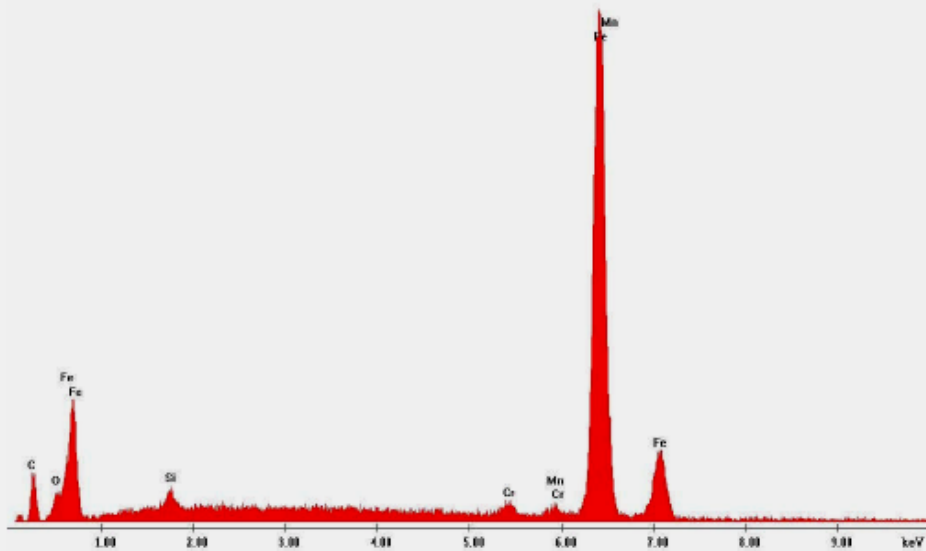


Bild 23:
Schwingungsreibverschleiß etwa 15 mm hinter dem Rissausgang; das Mikroanalyse-
spektrum der Kugeln in Bild 22 zeigt die reine Stahlanalyse

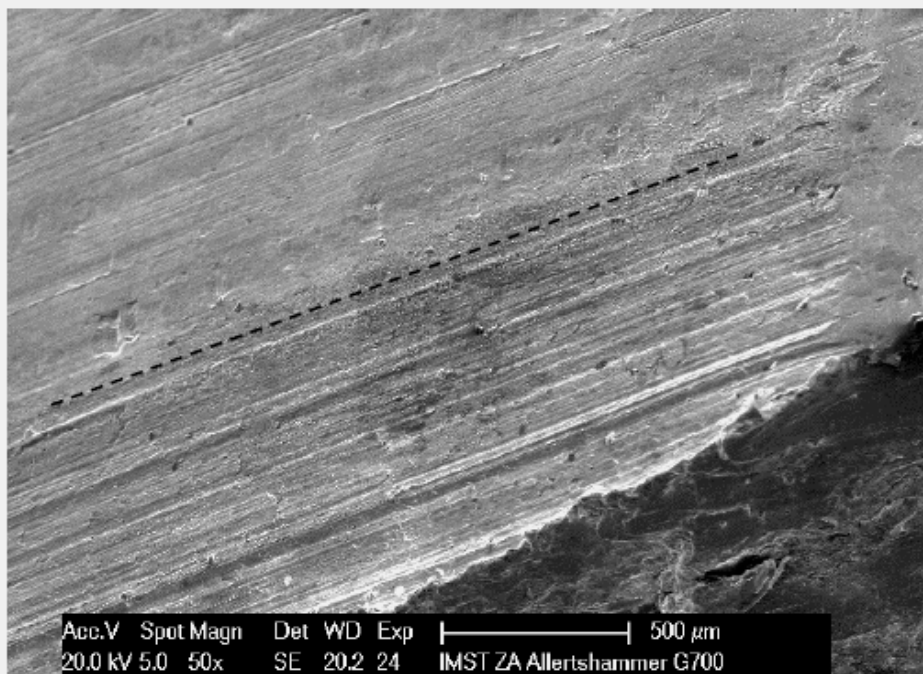


Bild 24:
Schleifriefen der Entlastungsmulde unterhalb der strichlierten Linie

DIPL.-ING. WOLFGANG ALLERTSHAMMER



Mein Zeichen
G 700/11-2

Datum
20.05.2011

Beilage/von
13 / 18

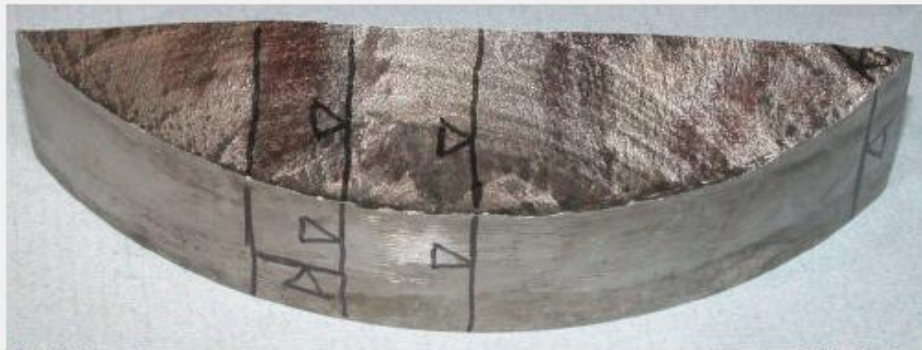


Bild 25: V = 2 : 1
Positionierung der Schliffproben; Probe 2 im Bereich Bruchausgang, Probe 3 links oben mit einer Schliffebene parallel zu Probe 2 und Probe 4 Querschliff im Bild unten in der verriebenen Zone



Bild 26: V = 6 : 1
Probenentnahme der Schliffe 7 und 8 (Probe 8 - Schrägschliff rechts im Bild), Bereich seitlich des Bruchausgangs, wo die eingearbeitete Entlastungsmulde noch am Rand des Bruches vorhanden ist

DIPL.-ING. WOLFGANG ALLERTSHAMMER



Mein Zeichen
G 700/11-2

Datum
20.05.2011

Beilage von
14 / 18



Bild 27: V = 34 : 1
Probe 2; Schliff durch den Bruchausgang, rechts Bruchfläche, ferritisch-perlitisches Werkstoffgefüge

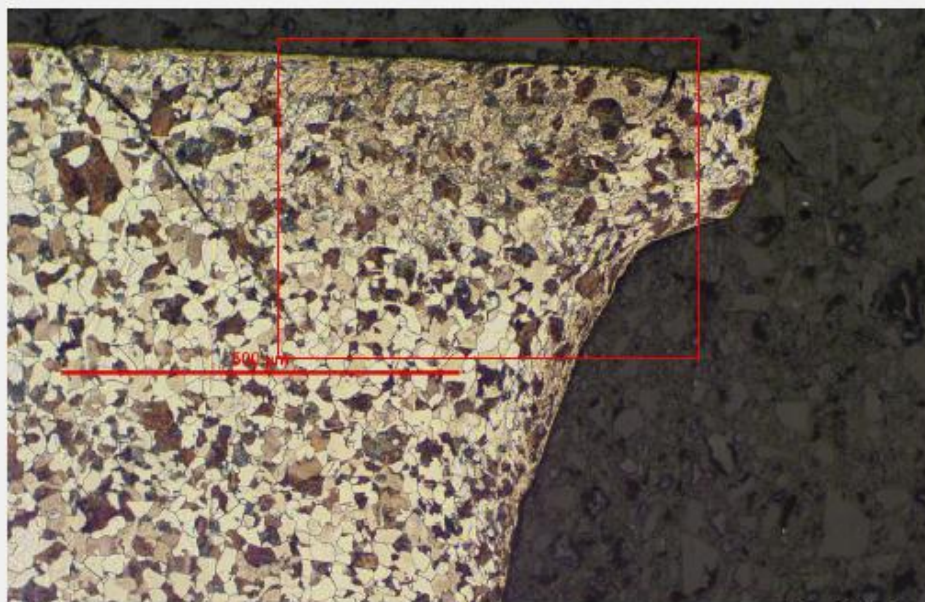


Bild 28: V = 130 : 1
Probe 2; stark anätzendes Gefüge des Ferrits, plastische Deformation und Nebenrisse am Rand des Bruchausgangsbereiches

DIPL.-ING. WOLFGANG ALLERTSHAMMER



Mein Zeichen
G 700/11-2

Datum
20.05.2011

Beilage von
15 / 18

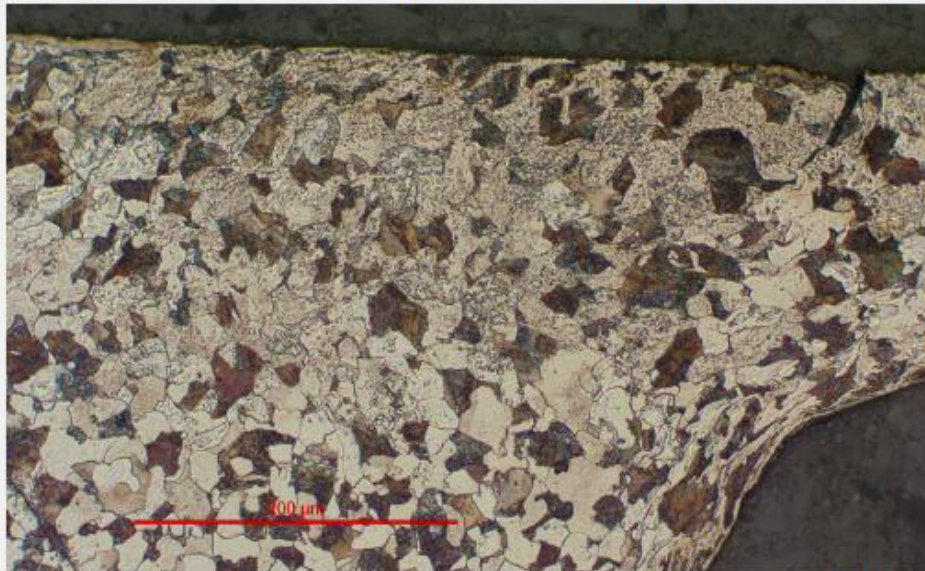


Bild 29: V=260 : 1
Probe 2, Bruchausgang; sehr starke Ausbildung von Substrukturen im Ferritgefüge unterhalb der Oberfläche; das an sich helle Ferritgefüge wirkt dadurch grau und grießartig

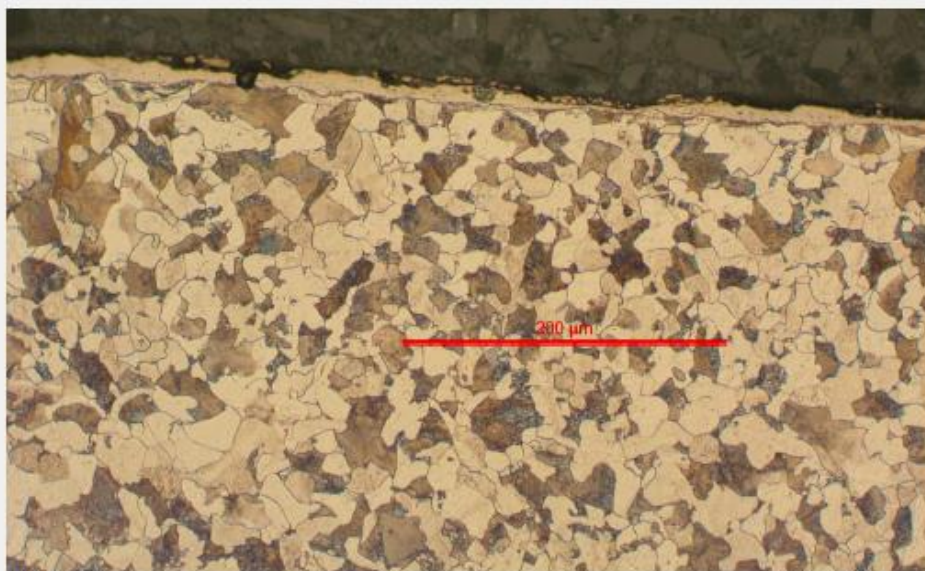


Bild 30: V = 260 : 1
Probe 2; Oberflächenstruktur im Bereich der rau und matt erscheinenden Verschleißzone der Welle, etwa 15 mm vom Bruchausgang entfernt; an der Oberfläche hat sich eine strukturlose Schicht gebildet.

DIPL.-ING. WOLFGANG ALLERTSHAMMER



Mein Zeichen
G 700/11-2

Datum
20.05.2011

Beilage/von
16 / 18

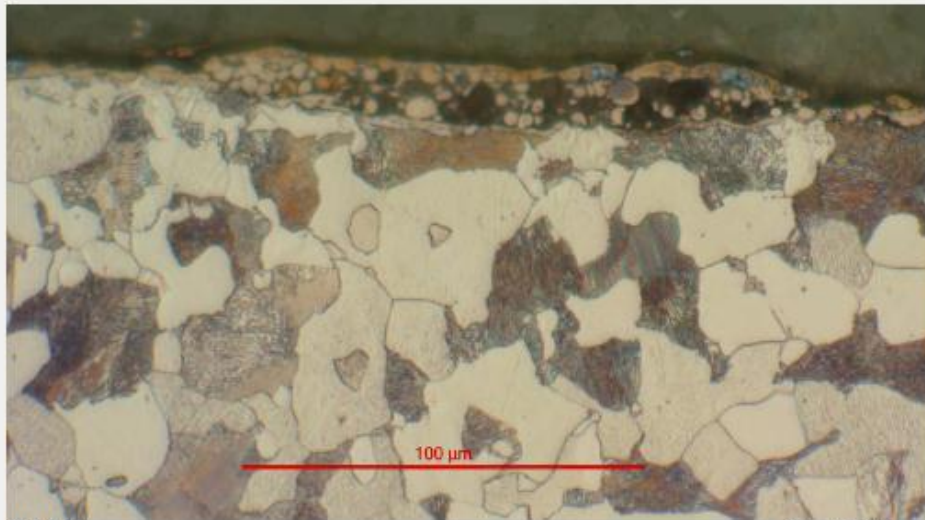


Bild 31: V = 670 : 1
Probe 2; Oberflächenstruktur im Bereich der rau und matt erscheinenden Verschleißzone; an manchen Stellen ist ein Oberflächenbelag mit globularen Partikeln vorhanden

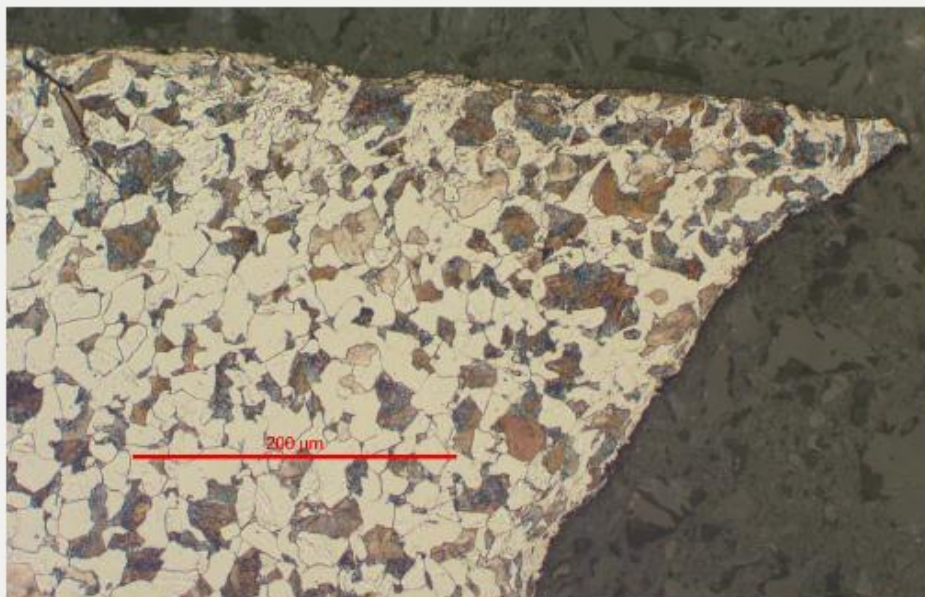


Bild 32: V = 260 : 1
Probe 3; Schliff neben dem Bruchausgang im Bereich eines visuell erkennbaren Nebenrisses und einer verquetschten Oberfläche; sehr starke Ausbildung von Substrukturen im Ferritgefüge unterhalb der Oberfläche; links Nebenriss; an der

DIPL.-ING. WOLFGANG ALLERTSHAMMER



Mein Zeichen
G 700/11-2

Datum
20.05.2011

Beilage von
17 / 18

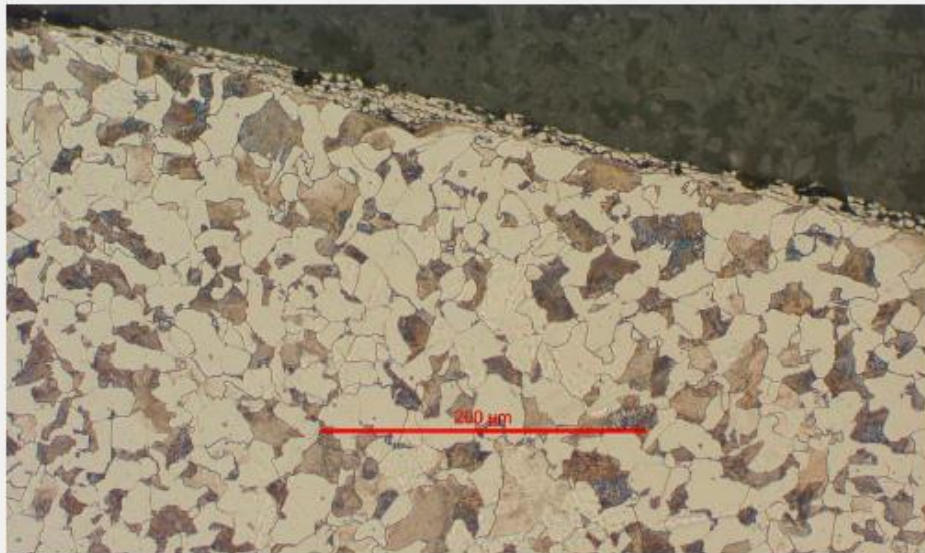


Bild 33: Probe 4, Querschliff im verriebenen Bereich der Oberfläche; an der Oberfläche ist eine einphasige Schicht mit globularen Partikeln aufgerieben
V = 260 : 1

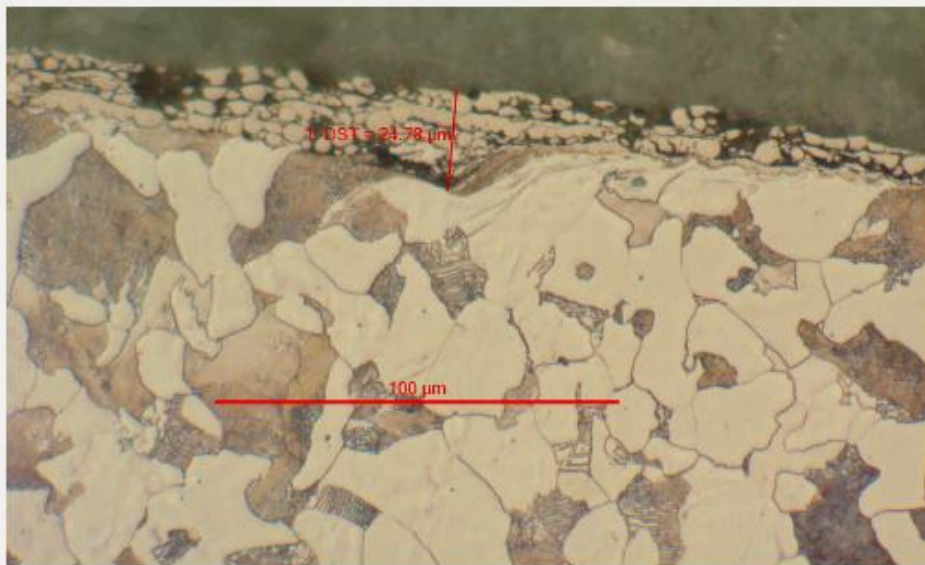


Bild 34: Probe 4, Querschliff, Detail der aufgeriebenen Schicht mit einer Dicke bis zu 25 µm; unterhalb plastische Deformation im oberflächennahen Bereich
V = 670 : 1

DIPL.-ING. WOLFGANG ALLERTSHAMMER



Mein Zeichen
G 700/11-2

Datum
20.05.2011

Beilage von
18 / 18

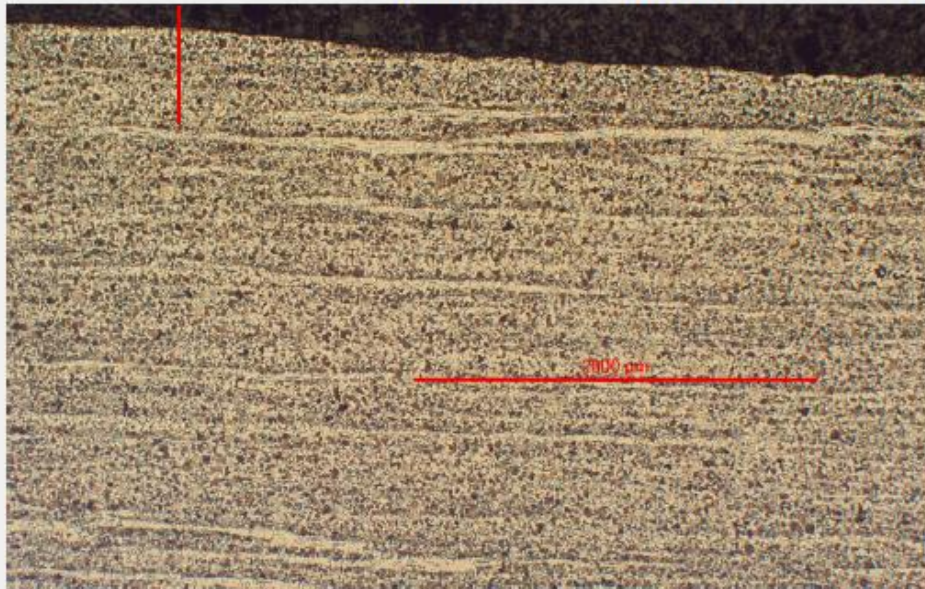


Bild 35: V = 34 : 1
Probe 7, Längsschliff im Bereich der Entlastungsmulde; am linken Rand noch
Lagersitzfläche bis etwa zur vertikalen Linie; rechts davon geschliffene Oberfläche der
Entlastungsmulde

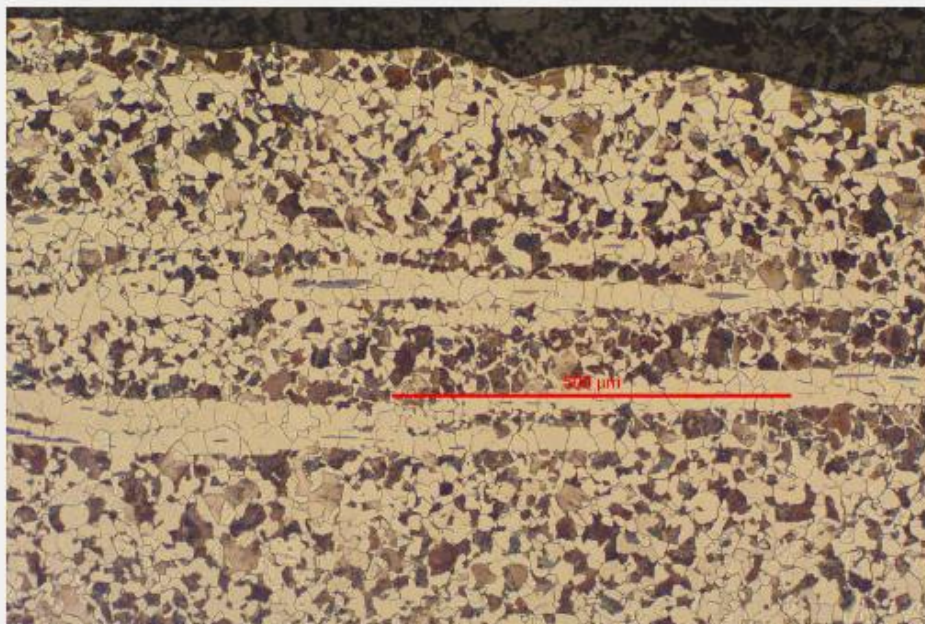


Bild 36: V = 130 : 1
Probe 7; wellige Oberfläche durch die Schleifriefen der Entlastungsmulde, es ist keine
plastische Verformung in Oberflächennähe erkennbar