Spezialschrauben
von Hightech bis Schrott

- **Hochfeste Schrauben**
  Kerneigenschaften
- **Hightech-Schrauben**
  Handbuch der ultrahochfesten Schrauben
- **Schadensfall 1**
  Schrauben mit Innensechskant und niedriger Kopfhöhe
- **Schadensfall 2**
  Schrauben mit extrem grossem Kopfdurchmesser

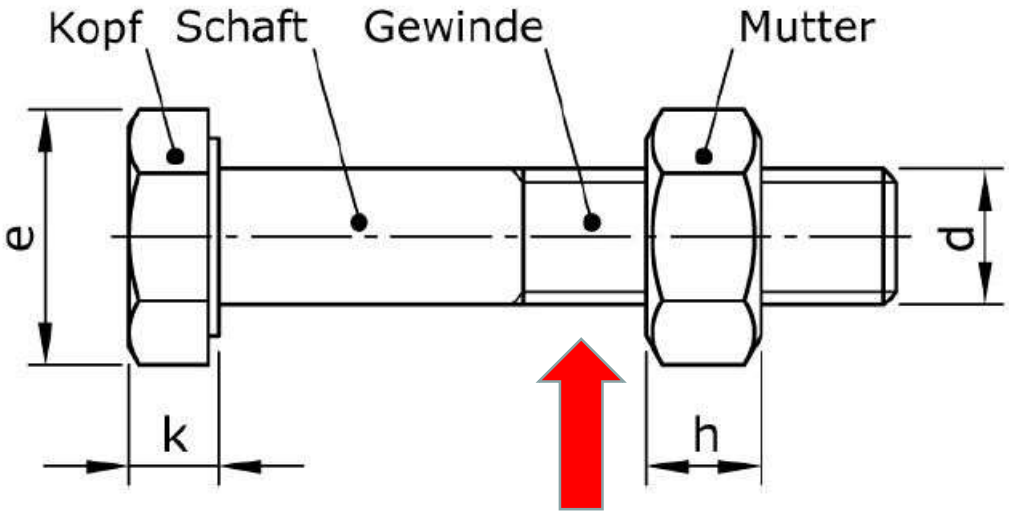
Ernst Moor, Dr. sc. techn.

MOOR SchadensManagement
Das Kompetenzzentrum für SchadensAnalysen

Kerneigenschaften hochfester Schrauben

- Konstruktionsprinzip
- Konstruktionsprinzip erfüllt
  mit Schrauben & Muttern nach EN ISO 898-1 & EN ISO 898-2
- Anforderungen zur Erreichung einer hohen Güte
- Ausführungskonzepte
- Gefahr der Wasserstoffversprödung

Konstruktionsprinzip
Versagen bei statischer Überbeanspruchung



Bruchlage
im freien belasteten Gewinde

bei Überbeanspruchung durch statische Zugkraft

siehe: Wiegand, Kloos & Thomala: Schraubenverbindungen, Springer-Verlag, 2007

Konstruktionsprinzip erfüllt
mit Schrauben & Muttern nach EN ISO 898-1 bzw. EN ISO 898-2

Die **Kombination**

- einer **Schraube**
  mit mechanischen Eigenschaften nach **EN ISO 898-1**

mit

- einer **Sechskantmutter** (Typ 1 oder Typ 2) nach EN ISO 4032
  mit mechanischen Eigenschaften nach **EN ISO 898-2**

erfüllt bei der Überbeanspruchung durch eine statische Zugkraft **das Konstruktionsprinzip**

*Die **DIN 934** für Sechskantmuttern wurde vor drei Jahrzehnten zurückgezogen **!!!***
Ersatz: 1992 durch die DIN EN 24032 und 2001 durch die DIN EN ISO 4032

MOOR SchadensManagement
Das Kompetenzzentrum für SchadensAnalysen

Anforderungen zur Erreichung einer hohen Güte

Grundwerkstoff

- Hohe Dehngrenze $R_{p0,2}$ (über den gesamten Querschnitt)
- Gute Duktilität & Zähigkeit
- Hohe metallurgische Güte
  - Hohe Reinheit bezüglich nichtmetallischen Einschlüssen
  - Niedrige Gehalte an Begleitelementen
  - Kein Wasserstoff aus der Stahlherstellung

Aufbringung Korrosionsschutz

- Keine Wasserstoff-Versprödung die zu verzögerten Brüchen führt
- Keine flüssigmetallinduzierten Risse die zu Schwingbrüchen führen

Korrosionsschutz im Betrieb

- Keine Wasserstoff induzierte Spannungsrisskorrosion

Ausführungskonzepte

Nicht korrosionsbeständiger Stahl mit Korrosionsschutz

- **Vergütungsstähle mit Korrosionsschutz**
  - Kathodischer Schutz
    - Phosphatüberzüge
    - Galvanisch aufgebrachte Überzugssysteme
    - Nichtelektrolytisch aufgebrachte Zinklamellenüberzugssysteme
    - Feuerverzinkung
  - Passiver Schutz
    - Anstrich / Pulverbeschichtung

Ausreichende Beständigkeit dank chem. Zusammensetzung

- **Korrosionsbeständige Stähle EN 10088-3**
  - Martensitisch
    - X4CrNiMo16-5-1 (1.4418)
      - +QT 760
      - +QT 900
  - Ausscheidungshärtend
    - X5CrNiCuNb16-4 (1.4542)
      - +P930

MOOR SchadensManagement
Das Kompetenzzentrum für SchadensAnalysen

Hochfeste Stähle - Gefahr der Wasserstoff-versprödung (Hydrogen Embrittlement) nach DIN EN ISO 4042:2018-11

Dauerhafter Verlust der Duktilität in einem Metall verursacht durch **Wasserstoff in Kombination mit Zugspannungen** durch äussere aufgebrachte Lasten und/oder innere Zugeigenspannungen

Unterscheidung nach Herkunft Wasserstoff

Interne Wasserstoffversprödung (IHE); fertigungsbedingt

- Restwassersoff aus der Stahlherstellung
- Restwasserstoff aus Prozessschritten:
  - Beizen
  - Elektrolytische Metallabscheidung

Externe Wasserstoffversprödung (EHE); umgebungsbedingt

- Wasserstoff der aus externen Quellen in das Metall eingelagert wird während es unter Zugspannungen steht
  - **Spannungsrisskorrosion** (**SpRK**, SCC): Wasserstoff entsteht als Nebenprodukt einer Oberflächen-korrosion und wird vom Metall aufgenommen

MOOR SchadensManagement
Das Kompetenzzentrum für SchadensAnalysen

Hightech-Schrauben
Handbuch der ultrahochfesten Schrauben

- **Handbuch der ultrahochfesten Schrauben**
- **Inhaltsverzeichnis**
- **Aus dem Vorwort**

MOOR SchadensManagement
Das Kompetenzzentrum für SchadensAnalysen

Handbuch der ultrahochfesten Schrauben

Handbuch der ultrahochfesten Schrauben

Grundlagen, Eigenschaften, Verschraubung und Anwendung

Horst Dieterle, KAMAX Automotive GmbH

VOGEL COMMUNICATIONS GROUP

1. Auflage, 2020

Inhaltsverzeichnis

1. Definition und Kennzeichnung
2. Leistungskennwerte von ultrahochfesten Schrauben
3. Montageverhalten
4. Verhalten gegenüber wasserstoffinduziertem Sprödbruch
5. Wärmebehandlungsverfahren, Werkstoffe, Gefüge
6. Oberflächenschutzsysteme für ultrahochfeste Schrauben
7. Anwendungsvorteile durch ultrahochfeste Schrauben
8. Alternative Werkstoffkonzepte für ultrahochfeste Schrauben

Aus dem Vorwort

- «Es ist für also für das Bauteil Schraube von grosser Bedeutung, dass neben einer **hohen Festigkeit** auch eine **ausreichende Werkstoffduktilität** vorhanden ist.»
- «Eine weitere Anforderung besteht insbesondere bei hochfesten und ultrahochfesten Schrauben darin, eine **hohe Unempfindlichkeit gegenüber wasserstoffinduziertem Sprödbruch** aufzuweisen.»
- Für **hochfeste Schrauben** beschreibt die Norm **DIN EN ISO 898-1** den Stand der Technik.
  Ultrahochfeste Schrauben mit Festigkeitsklassen 14.8 bis 16.8 (Festigkeit bis 1770 MPa) sind in der **Richtlinie VDA 235-205** beschrieben.

Schadensfall 1

Kopfbrüche bei Zylinderschrauben mit Innensechskant Niedriger Kopf, mit Schlüsselführung - DIN 6912

- Ausgangslage, was ist passiert
- Zugversuche an ganzen Schrauben
- Belastbarkeit dieser Schrauben
  - Gemäss Norm
  - Hinweis im Handel

MOOR SchadensManagement
Das Kompetenzzentrum für SchadensAnalysen

Schrauben & Anwendung
Schraubenbrüche

Schrauben

- M 14 x 80 nach DIN 6912; Festigkeitsklasse 12.9
- Werkstoff: 41Cr4; vergütet, brüniert und Dacromet beschichtet

Anwendung

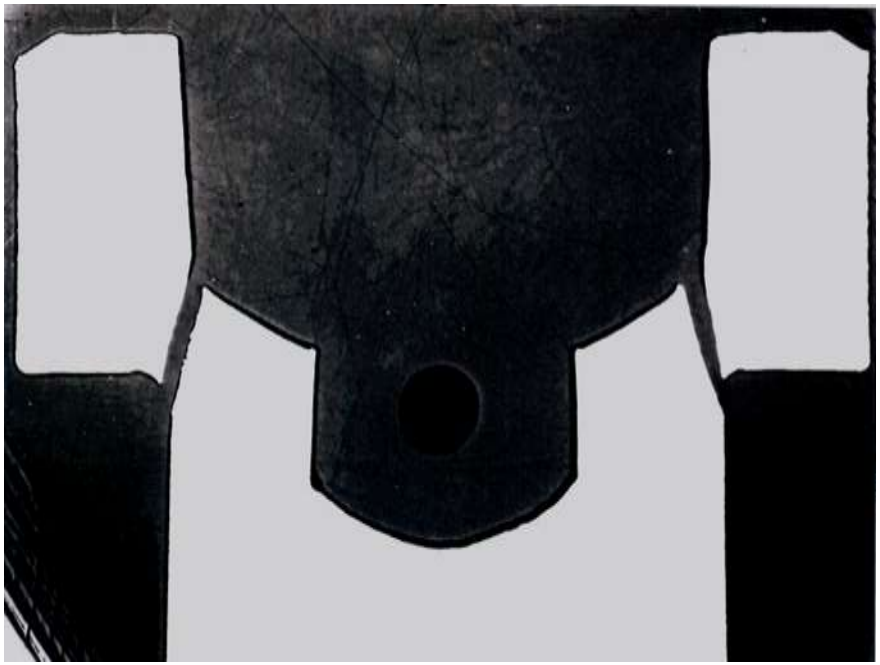
- Zur Übertragung hoher Axialkräfte; Anziehdrehmoment: 180 Nm

Schraubenbrüche (im Übergang Schaft zu Kopf)

- **Während der Montage** (ein defekter Drehmomentschlüssel (??) wurde ersetzt)
- Kurz (innerhalb einem Monat) nach der Inbetriebnahme der Anlage

Aufgetretene Kopfbrüche

Typ 1



Typ 2

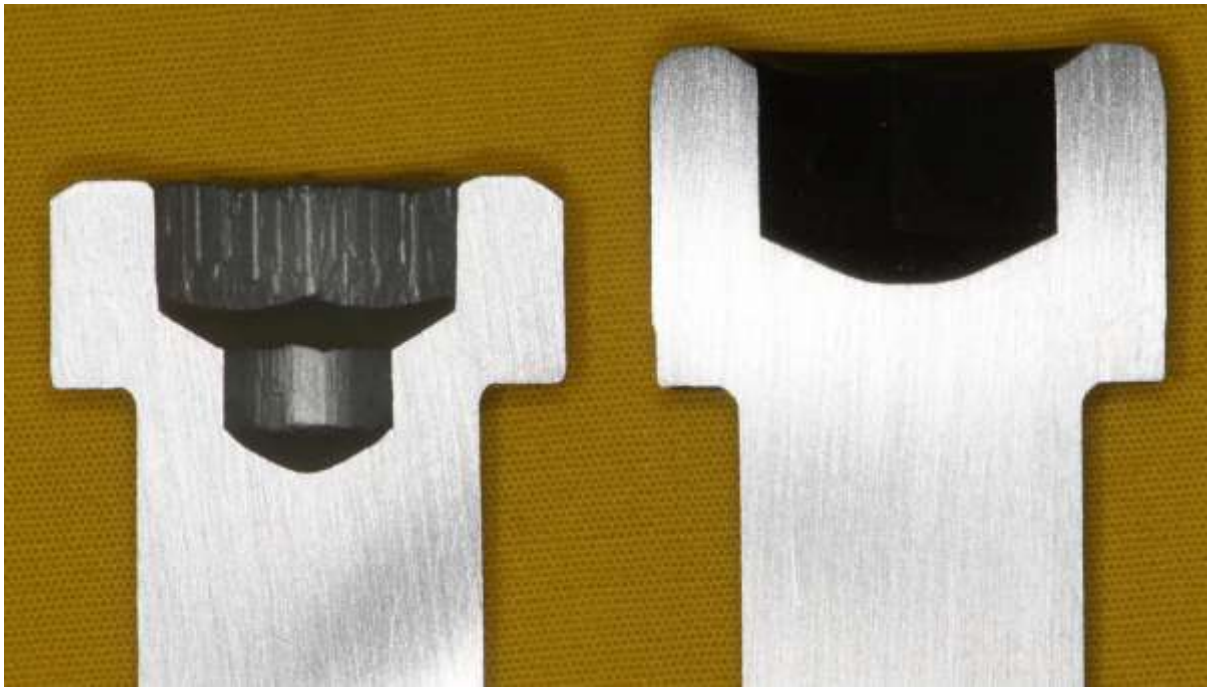
Zylinderschrauben M 14 mit Innensechskant
Kopfhöhen in den Ausführungen «Niedrig» und «Normal»

DIN 6912

Kopfhöhe: **8,5 mm**

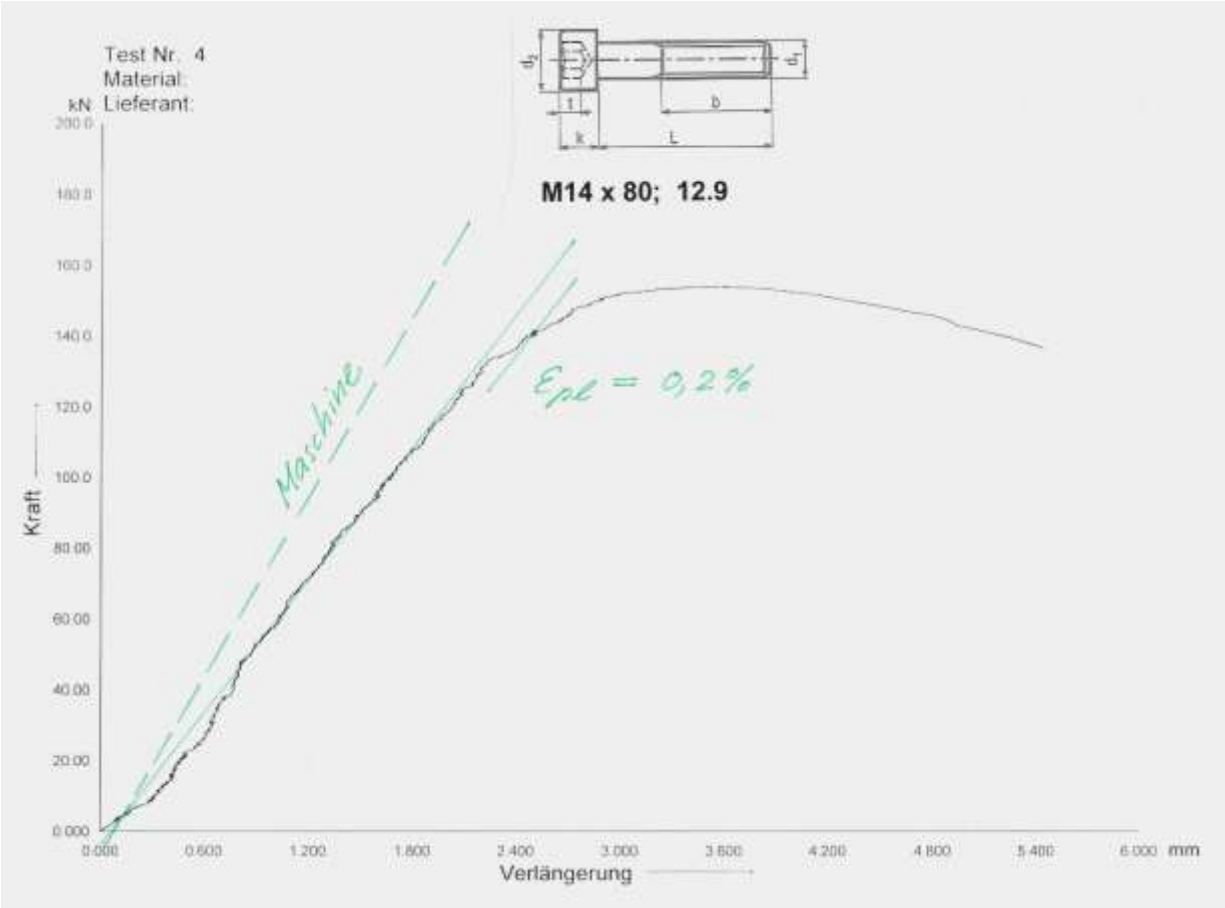
EN ISO 4762

Kopfhöhe: **14 mm**



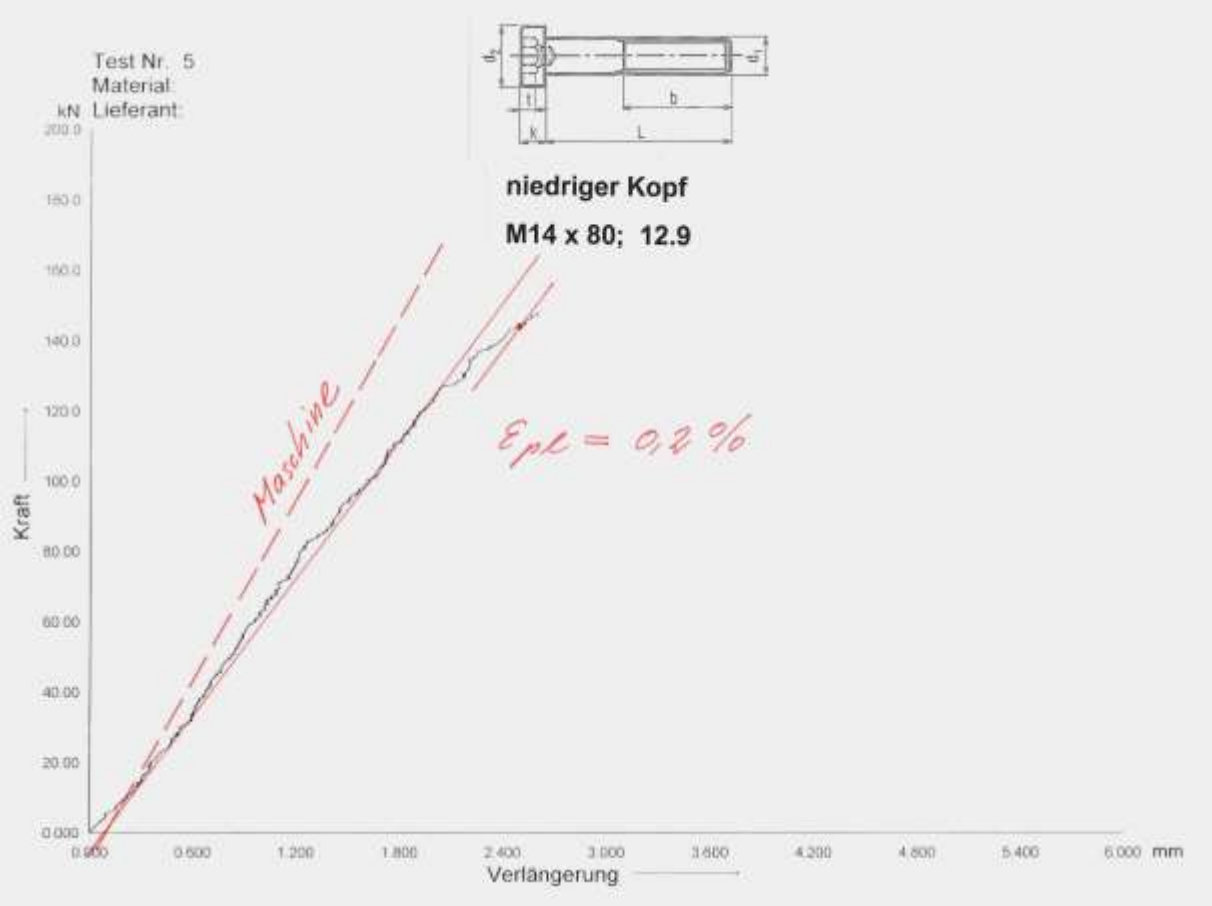
MOOR SchadensManagement
Das Kompetenzzentrum für SchadensAnalysen

Zugversuch an ganzer Schraube
Schraube nach EN ISO 4762



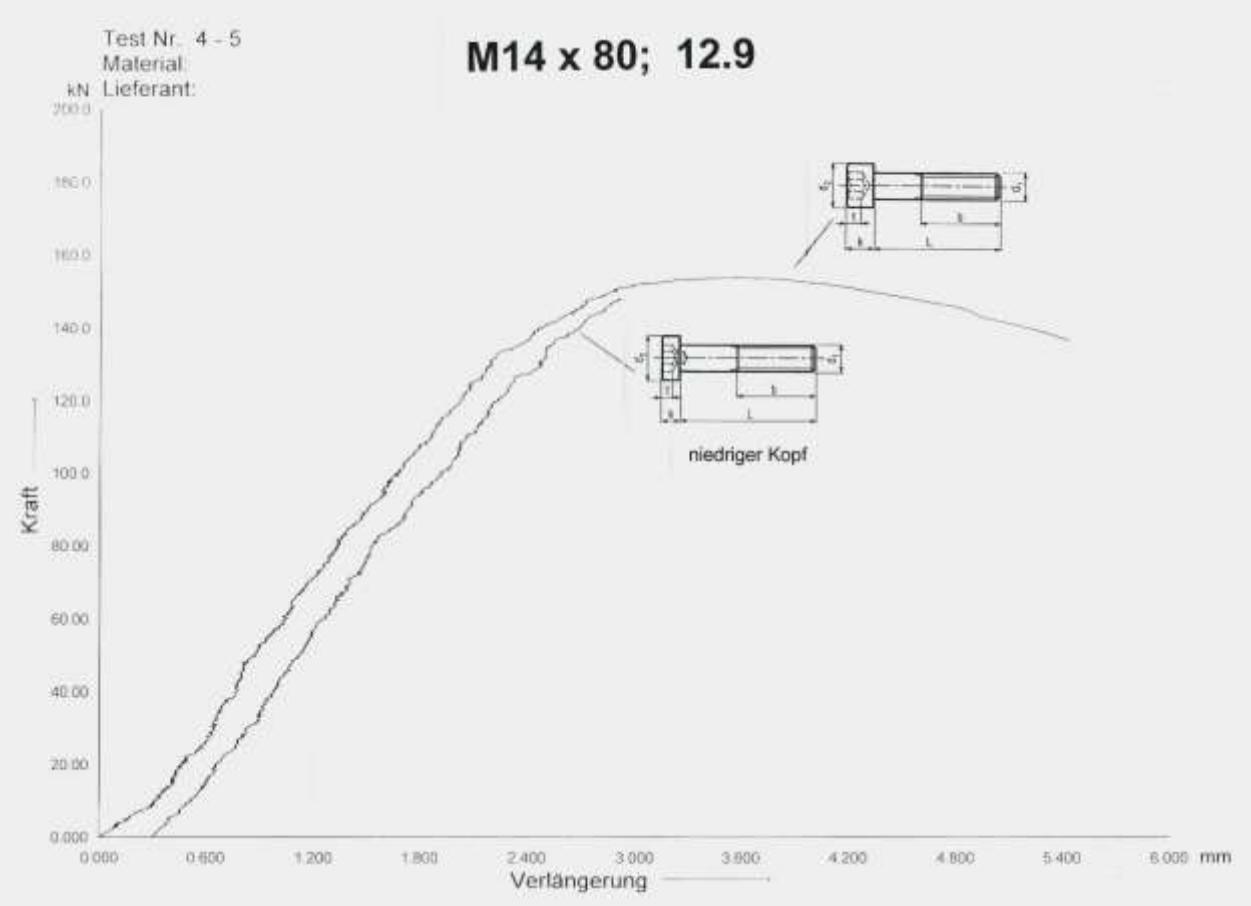
MOOR SchadensManagement
Das Kompetenzzentrum für SchadensAnalysen

Zugversuch an ganzer Schraube
Schraube nach DIN 6912 - niedriger Kopf



MOOR SchadensManagement
Das Kompetenzzentrum für SchadensAnalysen

Zugversuch an ganzen Schrauben
Vergleich: Standartschraube - Spezialschraube



MOOR SchadensManagement
Das Kompetenzzentrum für SchadensAnalysen

Axiale Belastbarkeit
Hinweise in der Norm DIN 6912

DIN 6912-1985

- Kritische Querschnitt kann unterhalb dem Innensechskant und nicht im Gewinde vorhanden sein. Es wird deshalb empfohlen die Schrauben nicht zur Übertragung hoher Axialkraft mit entsprechender Vorspannung zu verwenden.

DIN 6912-2002 & 2009

- Gegenüber EN ISO 898-1 reduzierte Mindestbruchkräfte
- Bruchlage: Gewindebereich, Schaft, Kopf oder Übergang von Kopf zu Schaft

DIN 6912-2021

- Titel: *Zylinderschrauben mit Innensechskant* ***und reduzierter Belastbarkeit*** *- Niedriger Kopf, mit Schlüsselführung*

MOOR SchadensManagement
Das Kompetenzzentrum für SchadensAnalysen

Axiale Belastbarkeit
Hinweise im Handel zu Schrauben nach DIN 6912

BOSSARD – Schraubenkatalog 1995

Diese Schrauben sollen

- **nicht zur Übertragung hoher Axialkräfte** verwendet werden

Der Innensechskant ist nur zum

- Festhalten der Schraube gegen Verdrehen beim Anziehen der Mutter gedacht

Sollen sie doch …

BOSSARD - Schraubenkatalog 2007

Infolge

- der Kopfgeometrie und
- Schlüsselangriffsform

werden diese Schrauben

- **zur Übertragung hoher Axialkräfte**
- mit entsprechender Vorspannung

nicht empfohlen

MOOR SchadensManagement
Das Kompetenzzentrum für SchadensAnalysen

Ursachen - Schadensfall 1

Kopfbrüche bei Zylinderschrauben mit Innensechskant
Niedriger Kopf, mit Schlüsselführung - DIN 6912

Die Schrauben sind

für die vorliegende Anwendung nicht geeignet

Der Konstrukteur

hat die Hinweise in der Norm nicht beachtet

Montage

Kopfbrüche bei der Montage !!! → **höchste Alarmstufe**

MOOR SchadensManagement
Das Kompetenzzentrum für SchadensAnalysen

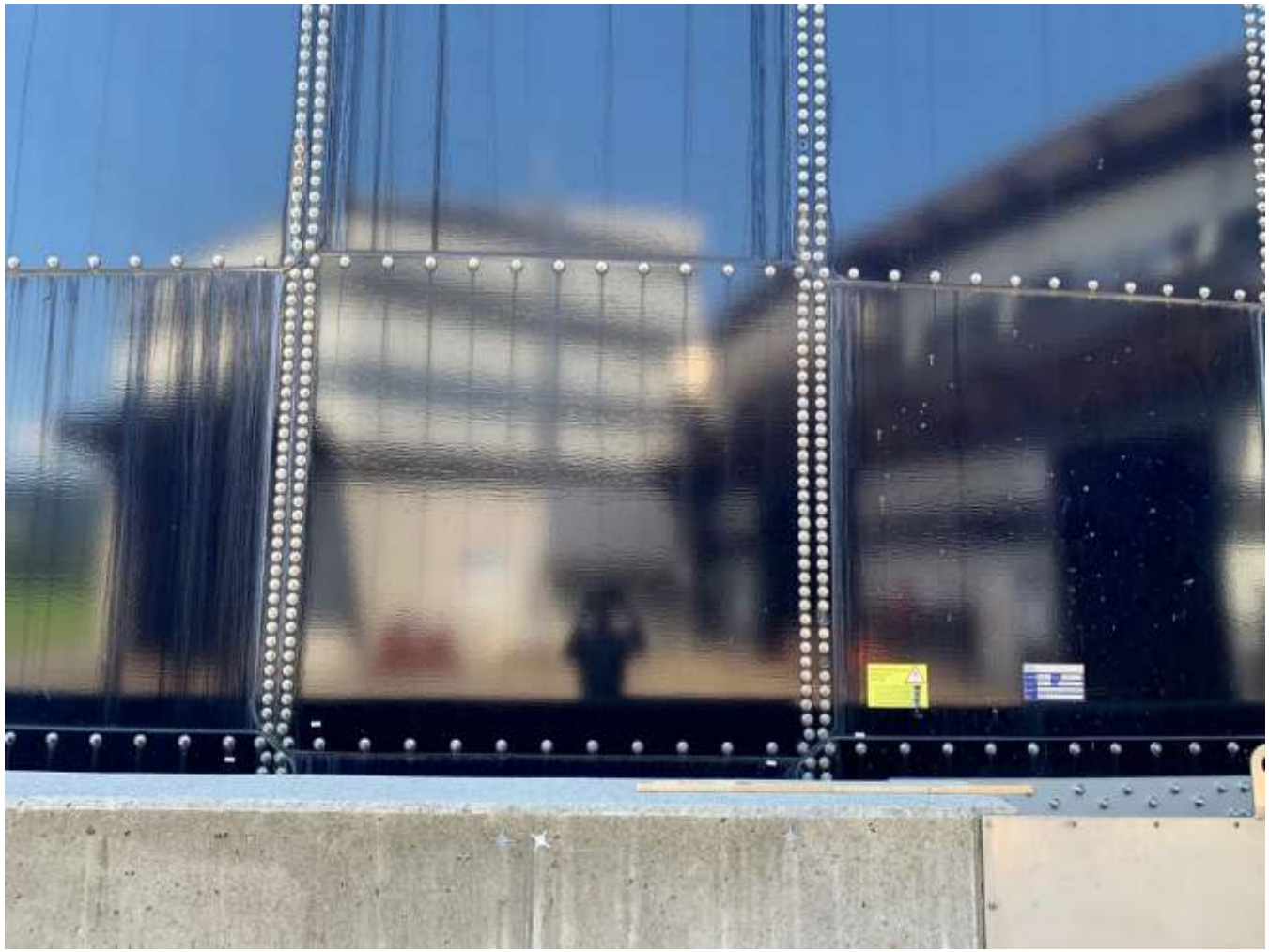
Schadensfall 2

Kopfbrüche - Schrauben mit grossem Kopfdurchmesser
Lagertank für flüssiges Gärgut

- **Phase 1**
  abgebrochene Schraubenschäfte
- **Phase 2**
  Identifizierung bruchgefährdeter Schrauben
- **Phase 3**
  Untersuchungen an ausgebauten Schrauben

MOOR SchadensManagement
Das Kompetenzzentrum für SchadensAnalysen

Lagertank für flüssiges Gärgut
Aufbau: verschraubte Stahlplatten



MOOR SchadensManagement
Das Kompetenzzentrum für SchadensAnalysen

Lagertank für flüssiges Gärgut
Kleine Leckagen > nachziehen der Schrauben

MOOR SchadensManagement
Das Kompetenzzentrum für SchadensAnalysen

Lagertank für flüssiges Gärgut
Die Schrauben

Schrauben

- Abmessung M12 x 35
- Werkstoff: Stahlgruppe A2
- Halbrundkopf mit Innensechskant
  - Abgeflacht
  - Durchmesser: 30,5 mm

MOOR SchadensManagement
Das Kompetenzzentrum für SchadensAnalysen

Phase 1
Untersuchungsmaterial

Schadensmaterial

- 6 abgebrochene Schraubenschäfte mit Gewinde

aus

- Nachziehvorgang mit Drehmoment: 20 ÷ 40 Nm

Vergleichsmaterial

- 1 neue Schraube
  - Dichtscheibe
  - Unterlagscheibe
  - Mutter
- 4 Schrauben aus Versuchen beim Tankhersteller

Phase 1
Abschätzung der Montagevorspannkraft

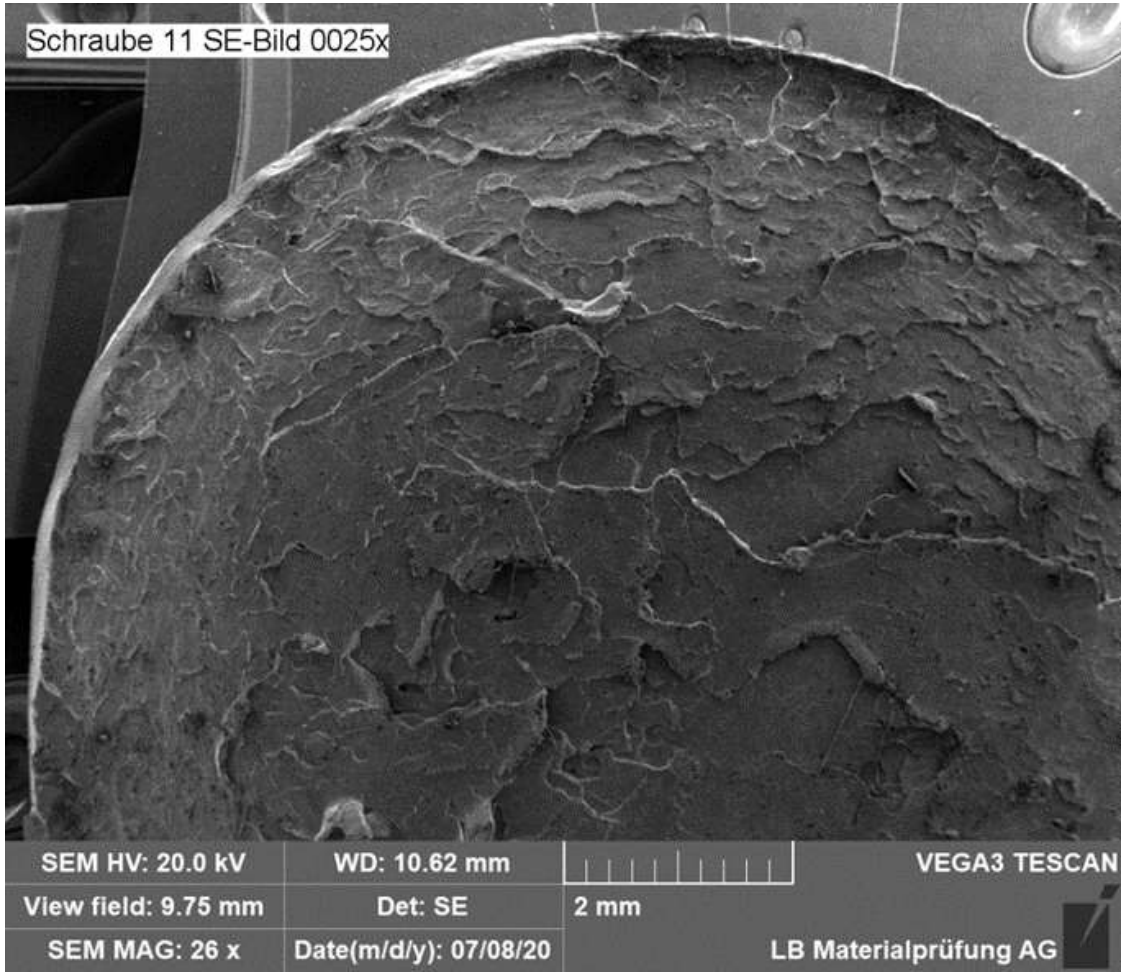
Ableitung der Montagevorspannkraft bei einem **Anziehdrehmoment von 40 Nm**

Reibungszahl μ in Mutter / Gewinde	Anzieh-drehmoment [Nm][	Montagevorspannkraft		Mindestbruchkraft [kN]
		Absolut [kN]	[%] von Mindestbruchkraft	
0,12	40	20,5	38,0	53,9
0,16	40	16,0	29,6	53,9
0,24	40	11,0	20,5	53,9

Tabelle 5.2

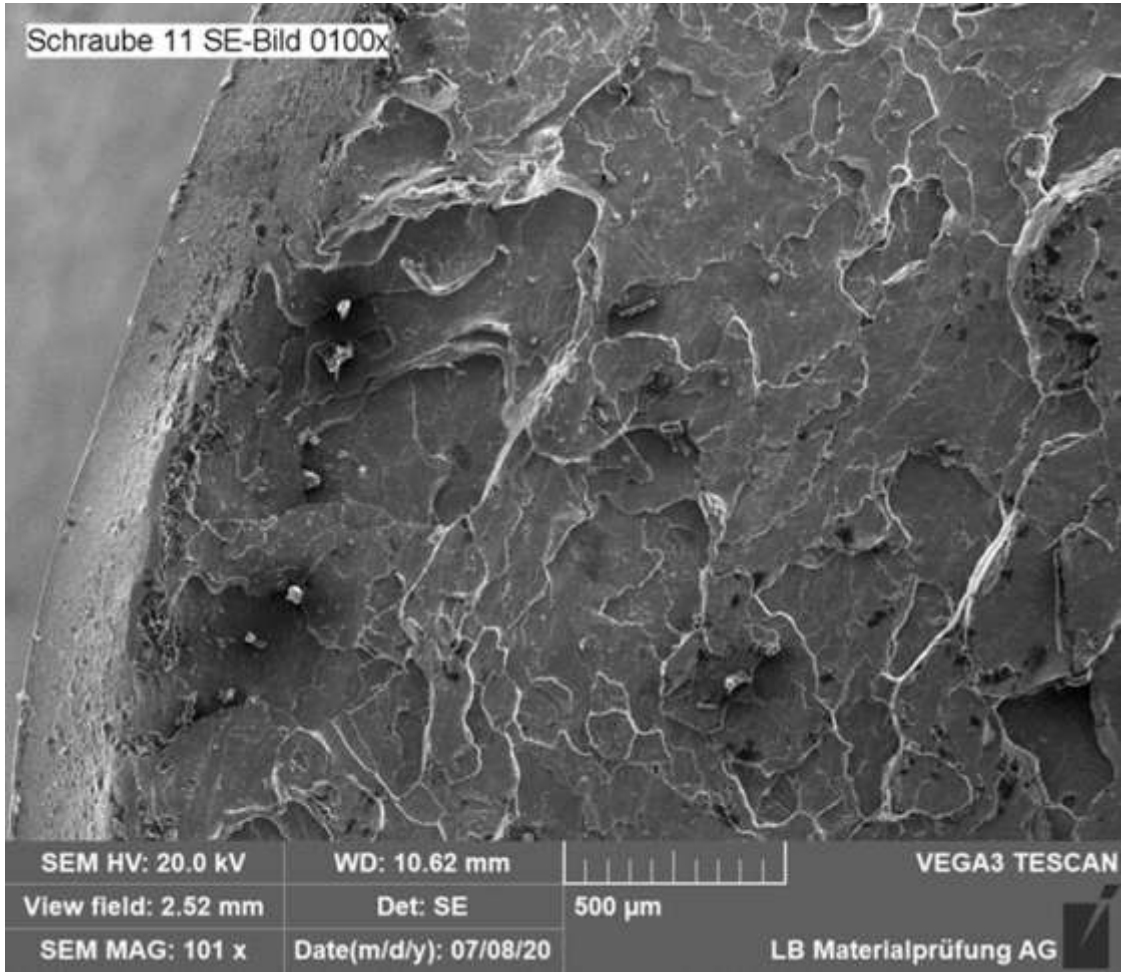
MOOR SchadensManagement
Das Kompetenzzentrum für SchadensAnalysen

Phase 1
Schraube 11 - Bruchfläche
Übersicht



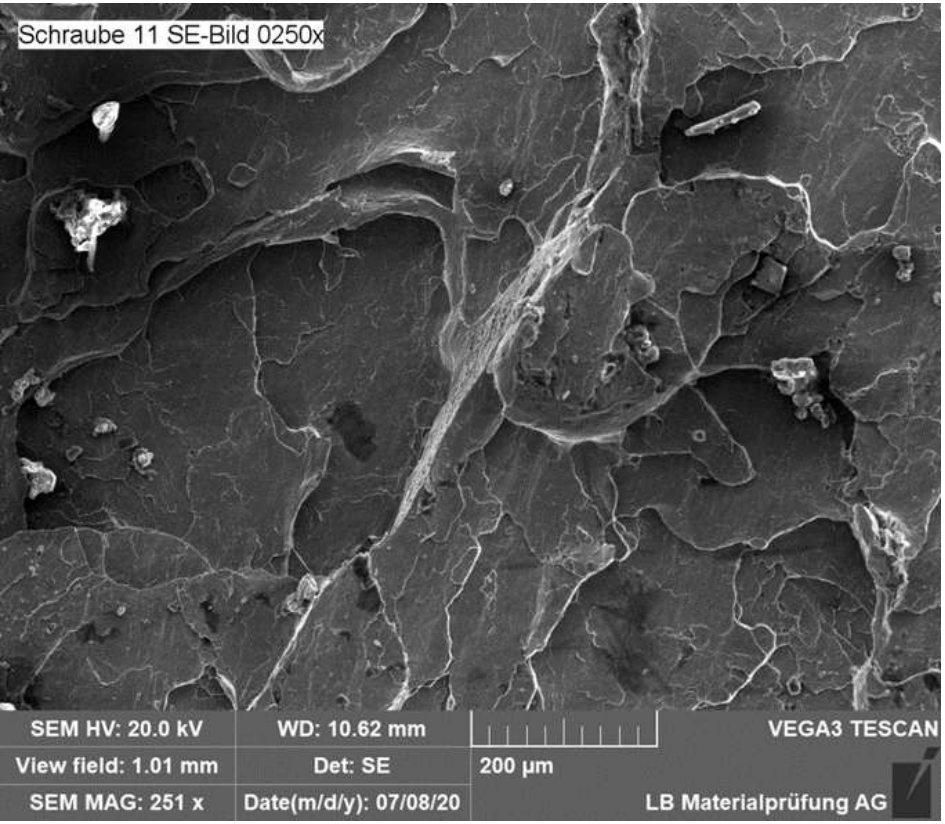
MOOR SchadensManagement
Das Kompetenzzentrum für SchadensAnalysen

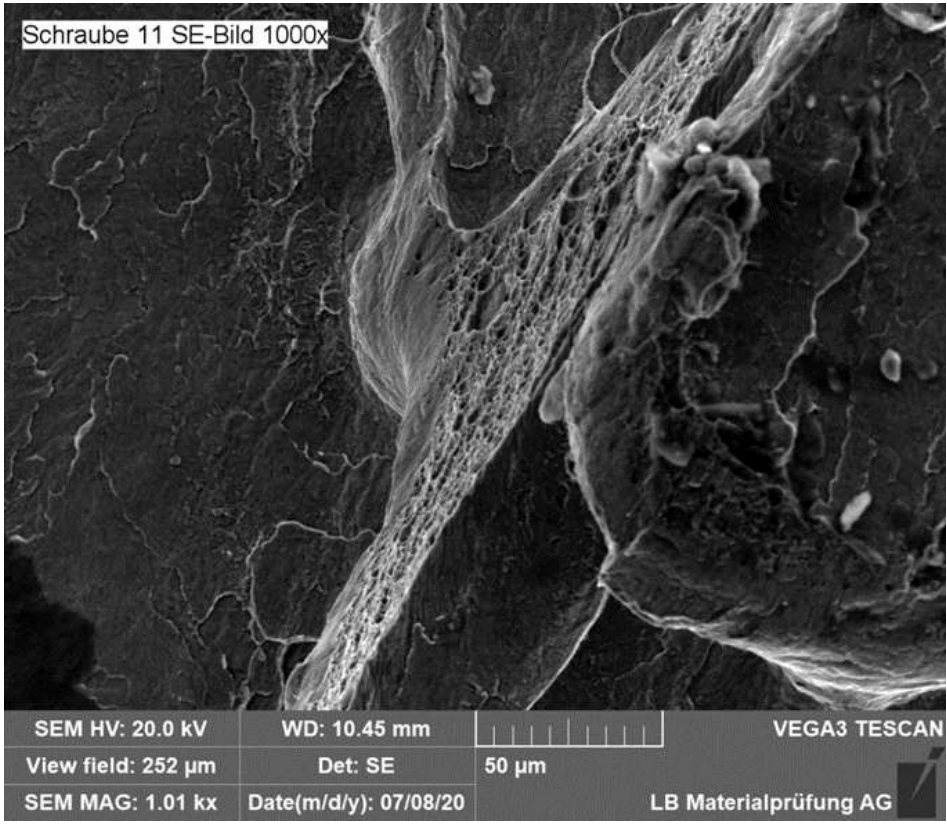
Phase 1
Schraube 11 - Bruchfläche
Detail Randbereich



MOOR SchadensManagement
Das Kompetenzzentrum für SchadensAnalysen

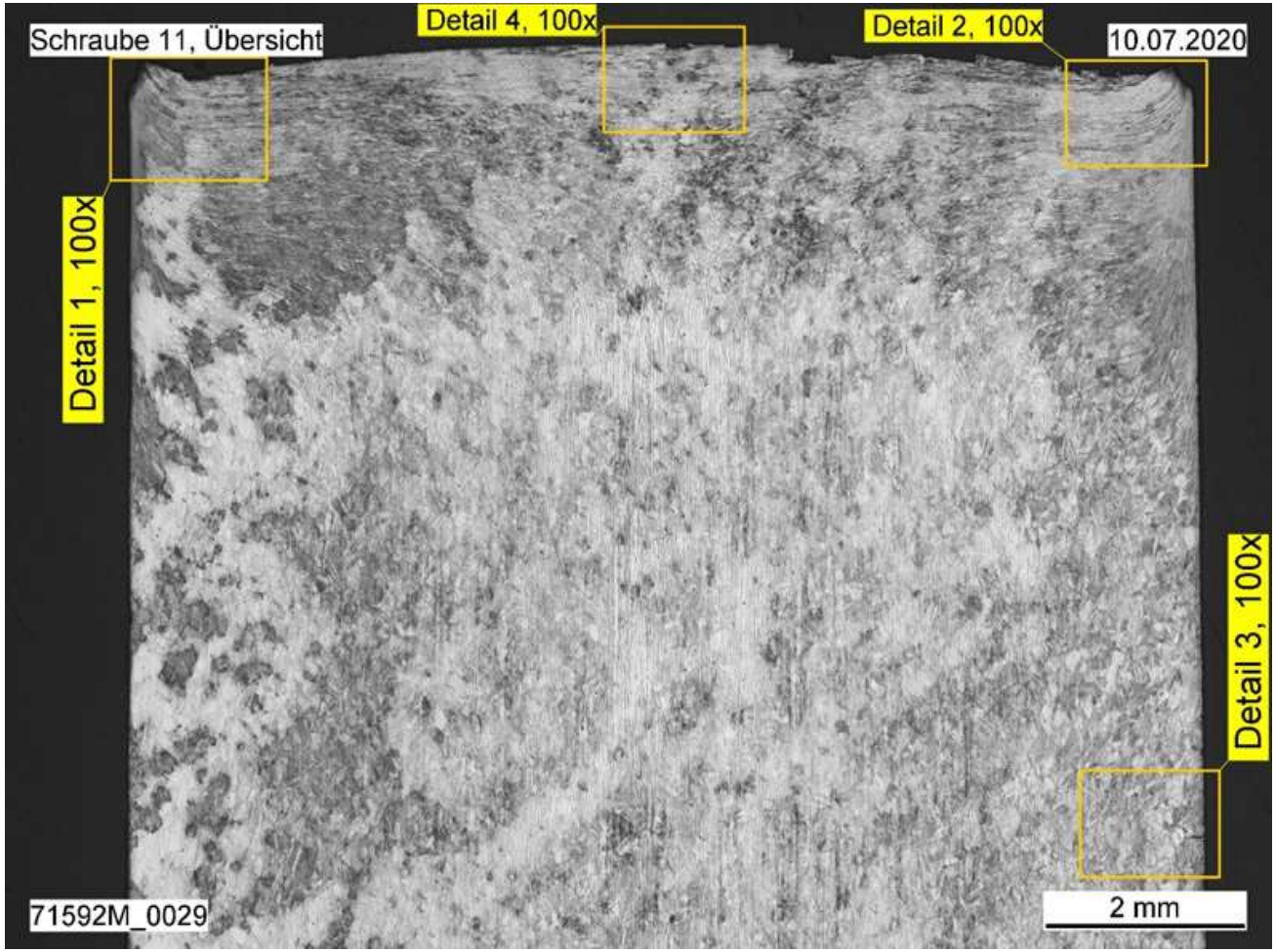
Phase 1
Schraube 11 - Bruchfläche
Vertiefung mit duktilem Übergang





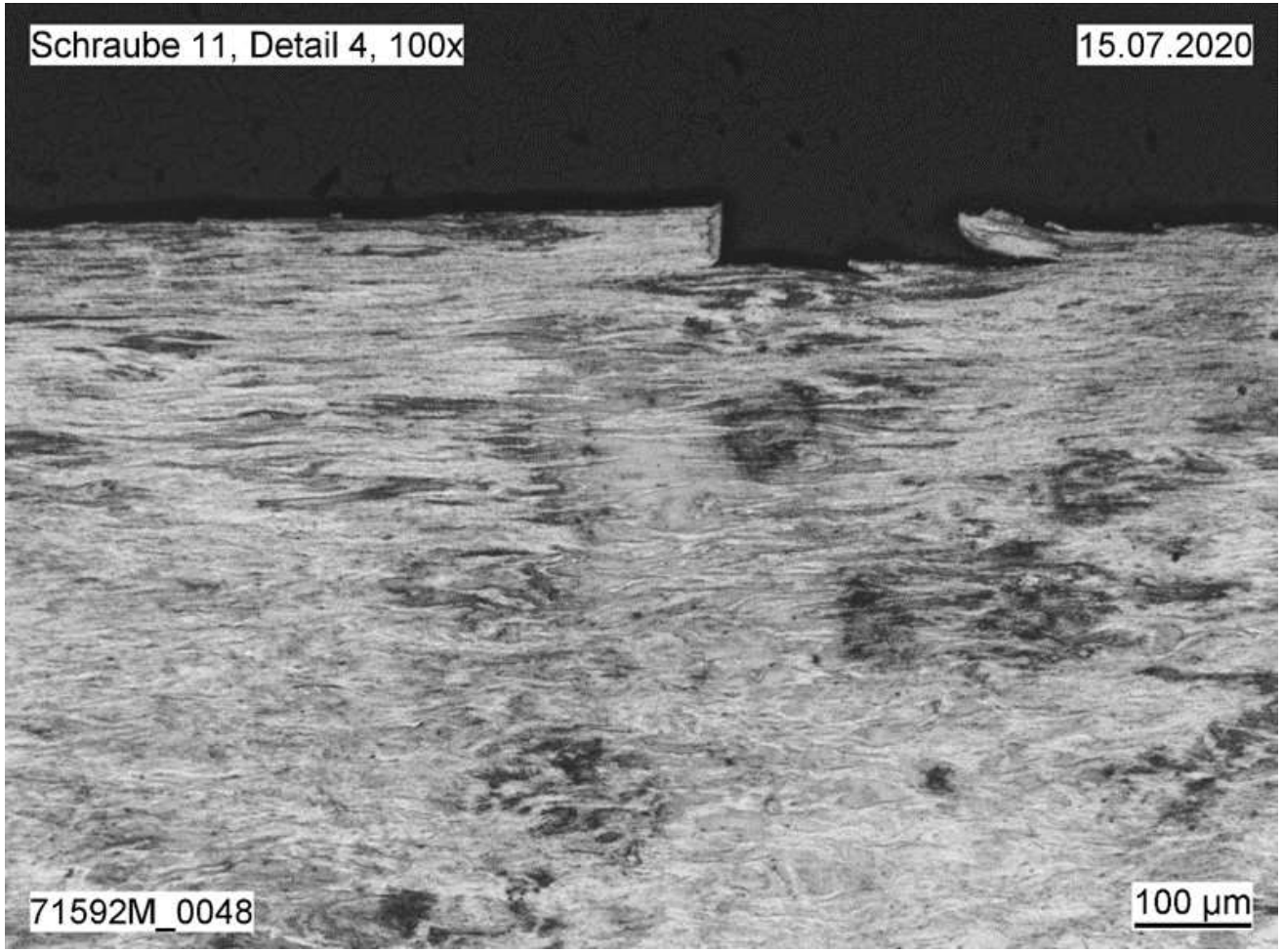
Phase 1

Schraube 11 - Mikroschliff in Richtung Schraubenachse Übersicht



Phase 1

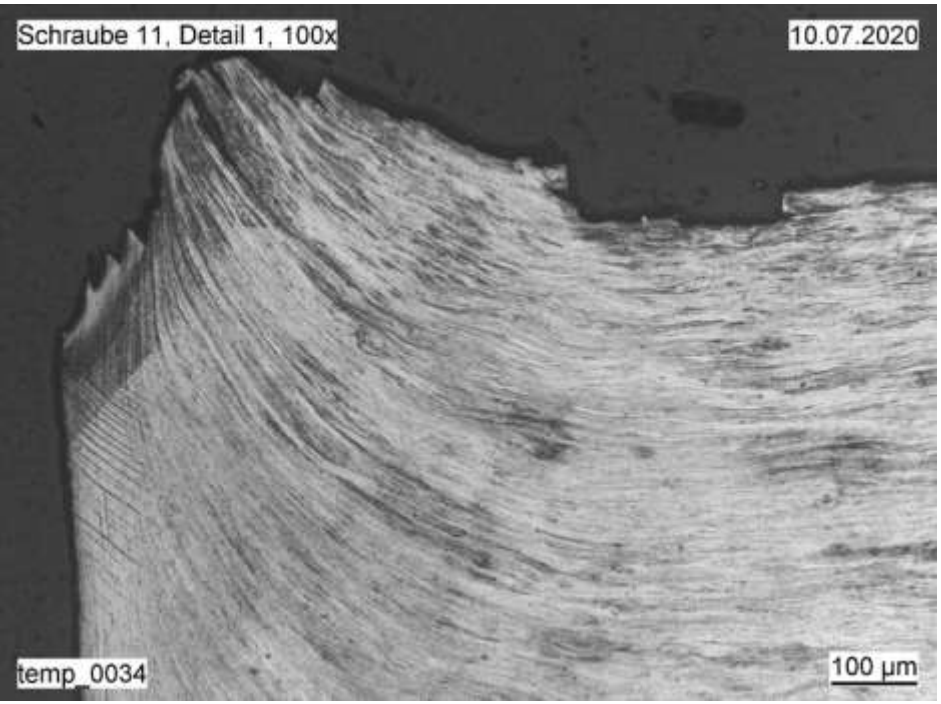
Schraube 11 - Mikroschliff in Richtung Schraubenachse
Detail 4 – Faserverlauf in der Schraubenmitte

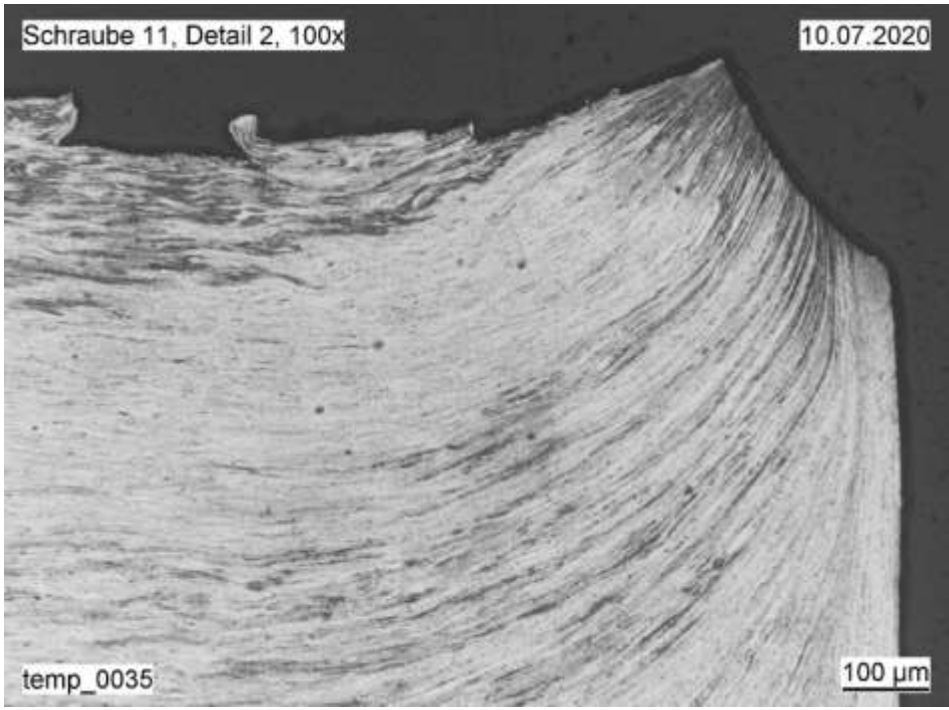


MOOR SchadensManagement
Das Kompetenzzentrum für SchadensAnalysen

Phase 1

Schraube 11 - Mikroschliff in Richtung Schraubenachse
Details 1 & 2 - Faserverlauf nahe Aussendurchmesser





Phase 1
Untersuchungsergebnisse

- Kopfbrüche bei 30÷40 % der Mindestbruchkraft
  - Terrassenbruch quer zur Schraubenachse
  - makroskopisch verformungslos
  - Mikroskopisch ohne nennenswerte Bruchstruktur
- Faserverlauf unterhalb dem Schraubenkopf
  - quer zur Schraubenachse

- Charakterisierung der Schäfte:
  - Werkstoff der Gruppe A2
  - Festigkeitsklasse 80

- Auffällig sind:
  - Phosphorgehalt liegt in der Nähe des max. zul. Wertes (0,05 %)
  - Al-Gehalt (0,002 %) sehr tief

Phase 1
Einschätzung von Prof. Dr.-Ing. K.H. Illgner

Einschätzung (Kurzfassung nach E. Moor)

- **Fehlerhafter Kaltumformprozess**
  - Wahl eines zu geringen Rohlingsdurchmessers
  - Unzweckmässiger Kopfvorstauchstadiengang

  Dadurch:

- Faserverlauf auf engem Raum praktisch senkrecht zum Schaftverlauf ausgerichtet, sogenannte **«Fliessschneide»**, allenfalls auch Mikroanrisse
- Beanspruchbarkeit der Schraube durch Zugkräfte erheblich beeinträchtigt

MOOR SchadensManagement
Das Kompetenzzentrum für SchadensAnalysen

Phase 1
Einschätzung von Prof. Dr.-Ing. K.H. Illgner

«Der aufgetretene Fertigungsfehler hat zu unsicheren bzw. unbrauchbaren Schrauben geführt.

Das gesamte so gefertigte **Schraubenlos** ist als **Ausschuss** einzustufen.

Es sollte nicht Verwendung finden.»

MOOR SchadensManagement
Das Kompetenzzentrum für SchadensAnalysen

Phase 1
Einschätzung eines weiteren Experten

Zum **Kaltanstauchen des Kopfs**:

- **Sehr breite Pilzköpfe** führen zu:
  - starkem Querfliessen
  - ev. mit Werkstofftrennungen durch Delamination
- **Kaltverfestigung**
  - Bei Austenit doppelt so hoch wie bei Ferrit
- **Verformungsmartensit**
  - A2 bildet 10x mehr als A4

SpRK

- Zeitverzögertes Versagen
- Scharfe Kerben in einem kritischen Werkstoffzustand
  - Verformungsmartensit kann Kerbspannung nicht abbauen

Allenfalls Wechsel von A2 zu A4 in Erwägung ziehen

MOOR SchadensManagement
Das Kompetenzzentrum für SchadensAnalysen

Phase 1
MOOR: Beurteilung & Empfehlung

Beurteilung

Unterwartet aufgetretene Brüche bei niedrigem Nachziehdrehmoment:

- Falsch konzipierter Kaltumformprozess bei Anstauchen des Kopfes
  - Reduzierte Belastbarkeit
  - Hohes Risiko für SpRK

Auswechseln sämtlicher Schrauben dieser und ähnlich gefertigter Chargen

Empfehlung

Schraubenbrüche mit dem **Tankhersteller** aufarbeiten:

- Bestellung, Anforderungen
- Losgrössen, mehrere Hersteller
- Eingangsprüfungen
- Erfahrungen mit Schrauben aus nichtrostenden Stählen

MOOR SchadensManagement
Das Kompetenzzentrum für SchadensAnalysen

Phase 2
Identifizierung der «Schrott-Schrauben»

X tausend Schrauben mit Kopf im flüssigen Gärgut

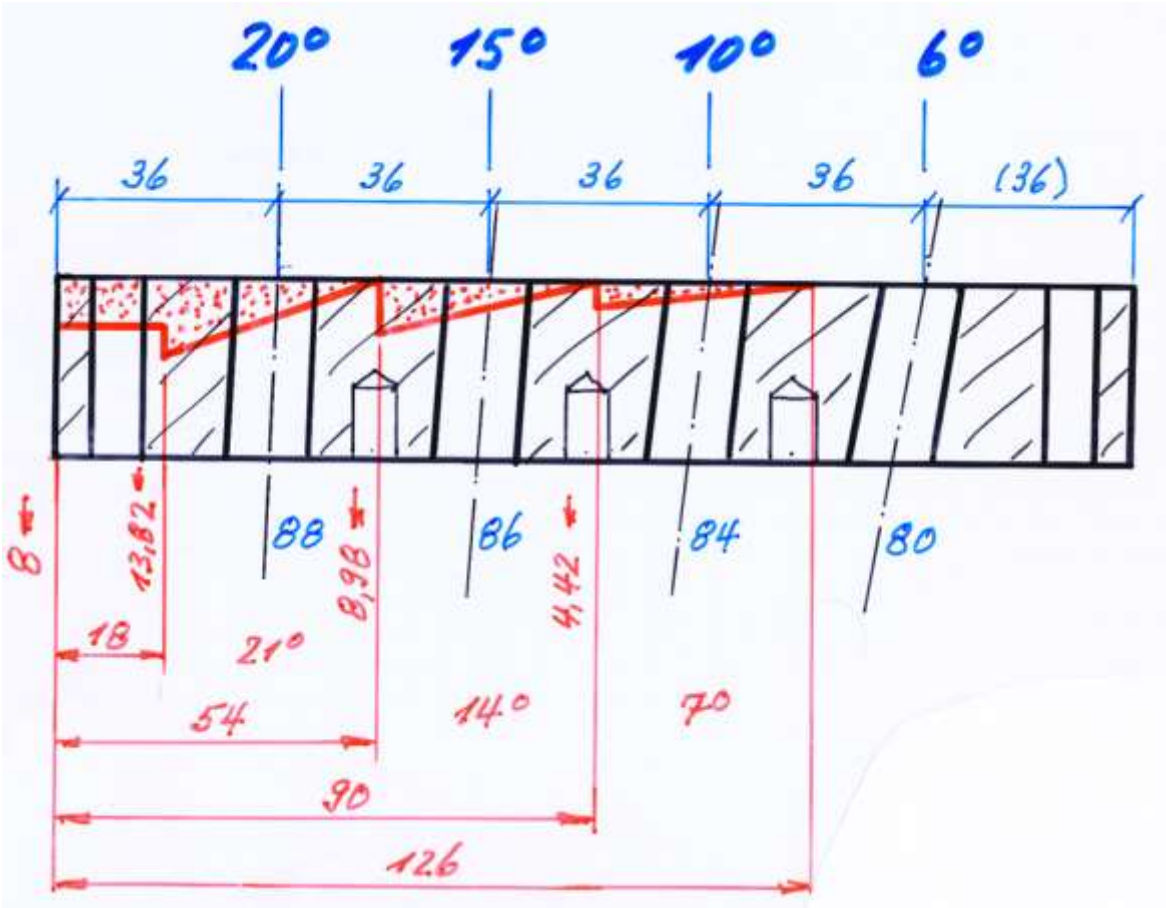
Wir hatten **Glück** in einer äusserst misslichen Situation:

- Schrott-Schrauben
  - Schaftende signifikant **stärker magnetisch** als bei den Schrauben der beiden andern Hersteller
  - Schaftende mit **Braue**

Identifizierung mit Magnet:

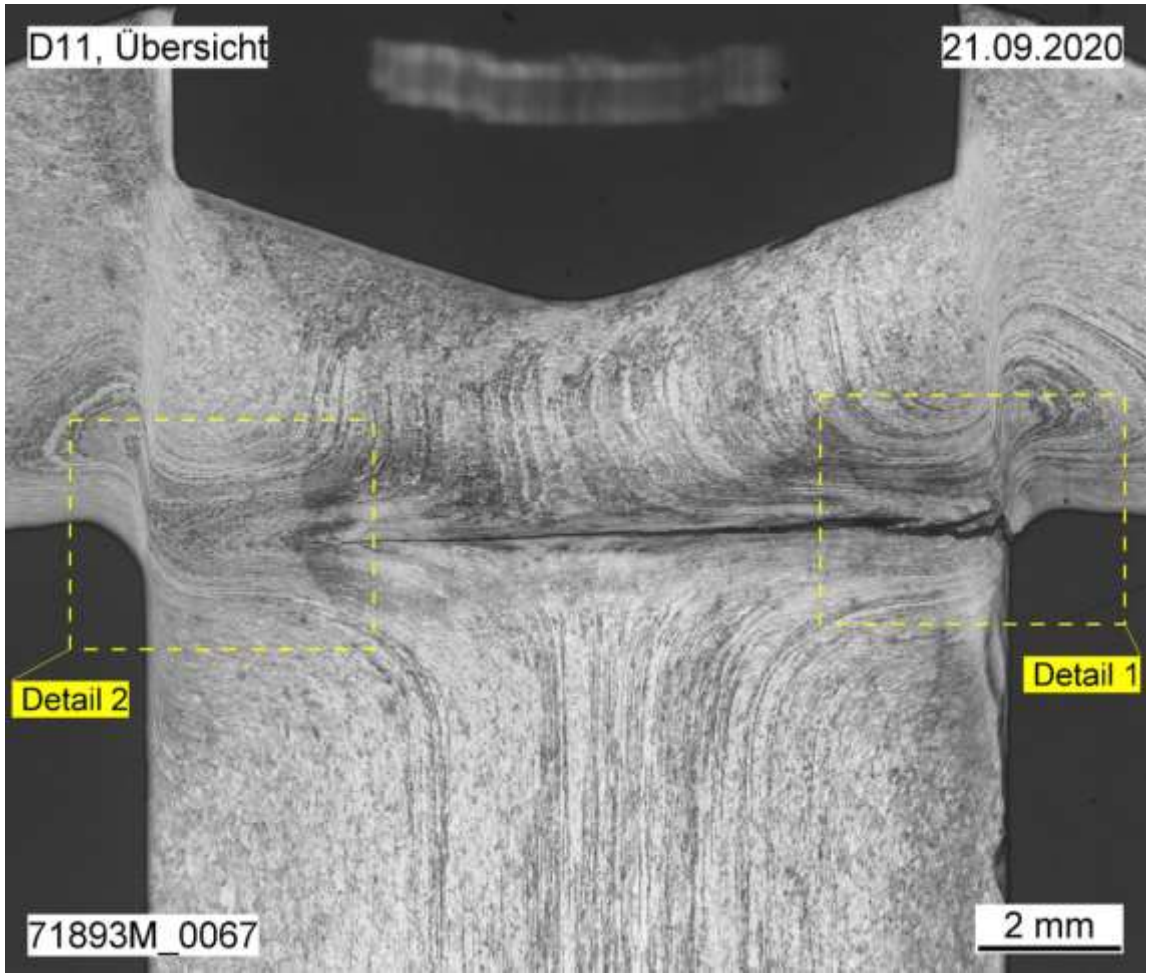
303 Schrott-Schrauben

Phase 2
Bereitstellung guter Ersatz-Schrauben



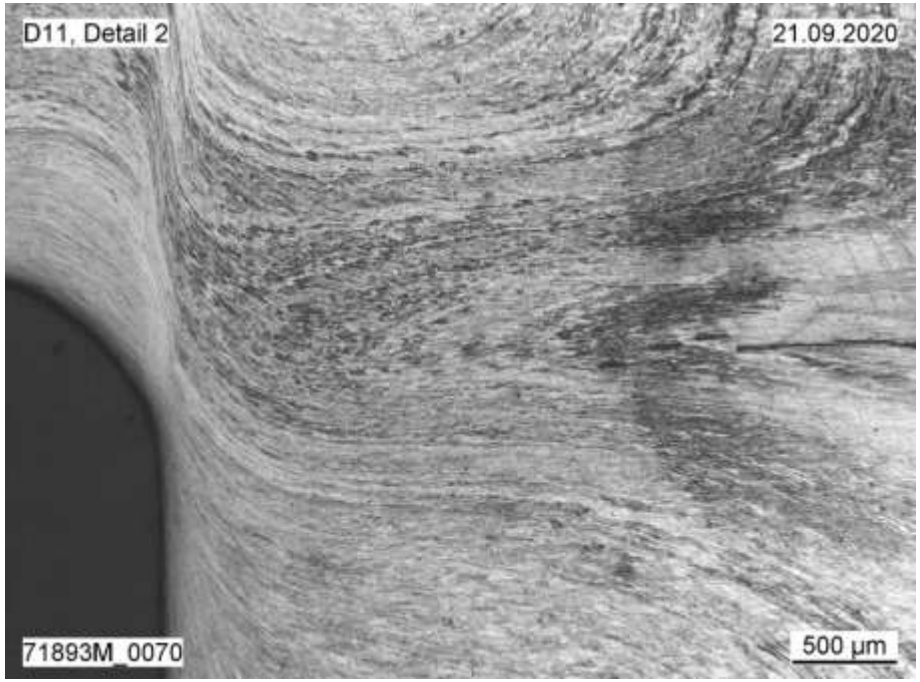
MOOR SchadensManagement
Das Kompetenzzentrum für SchadensAnalysen

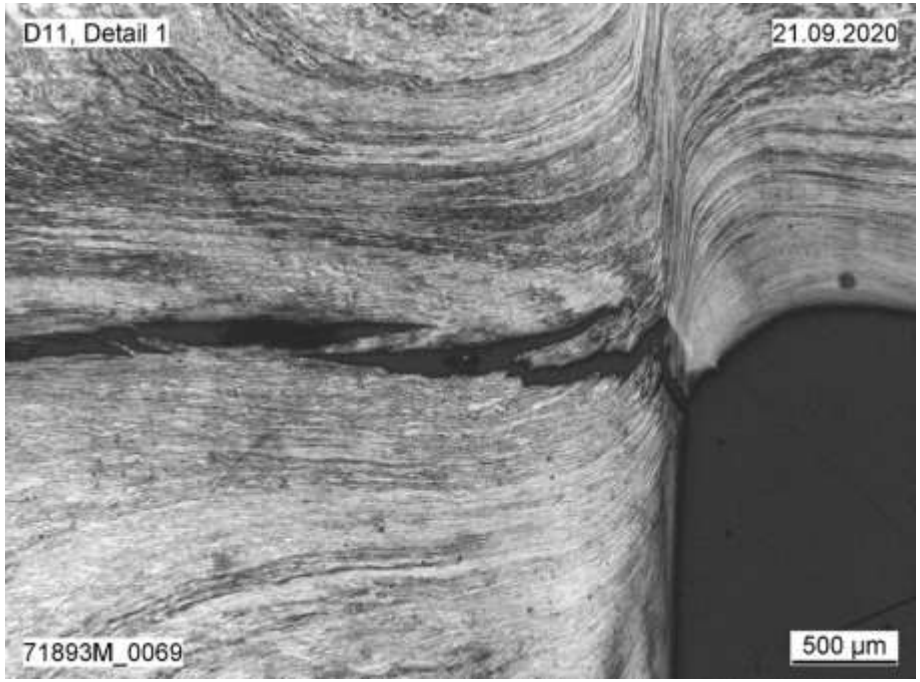
Phase 3
Schraube D11 - Typ: Schrott
Zustand nach Ausbau



MOOR SchadensManagement
Das Kompetenzzentrum für SchadensAnalysen

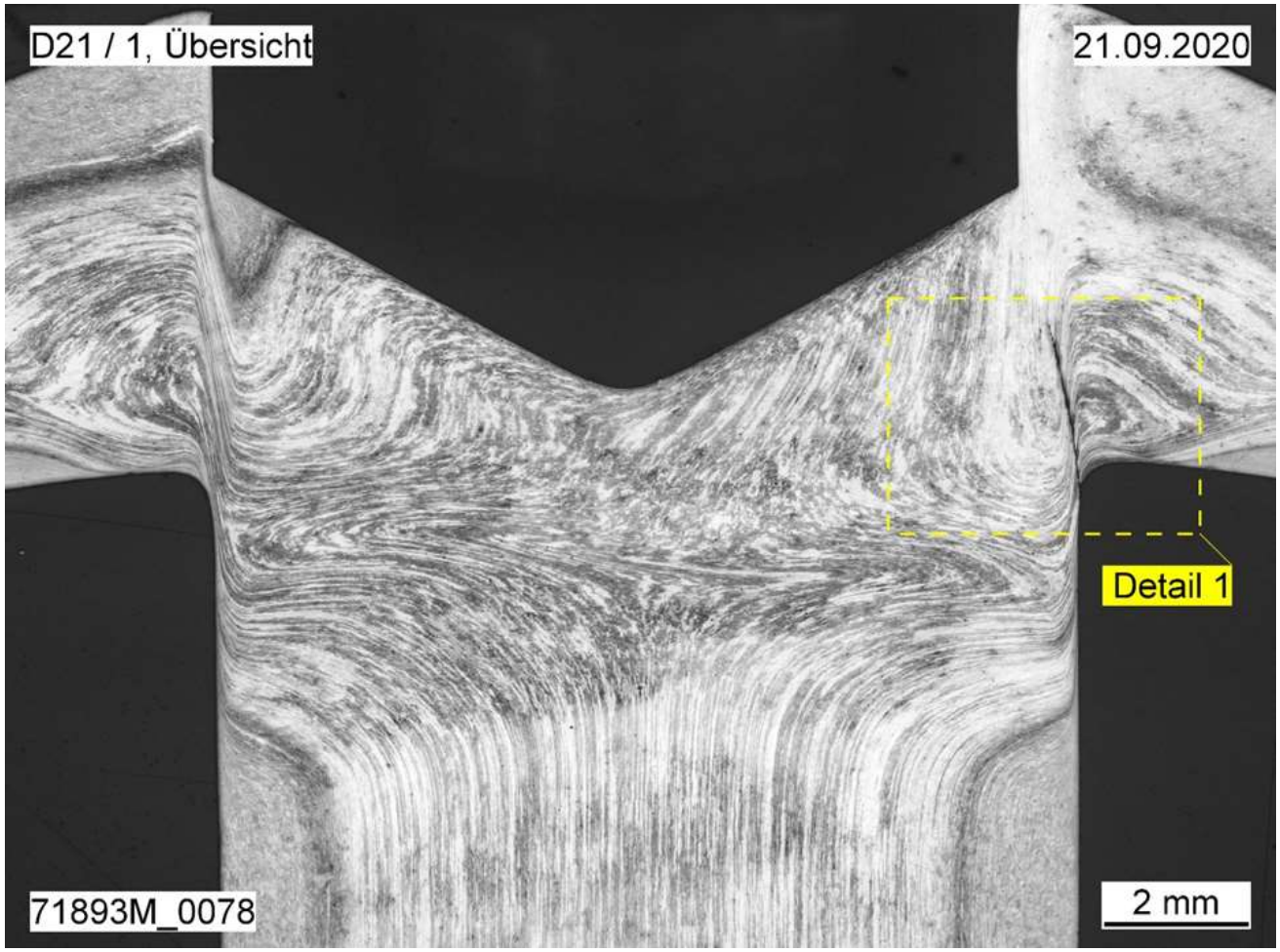
Phase 3
Schraube D11 - Typ: Schrott
Zustand nach Ausbau





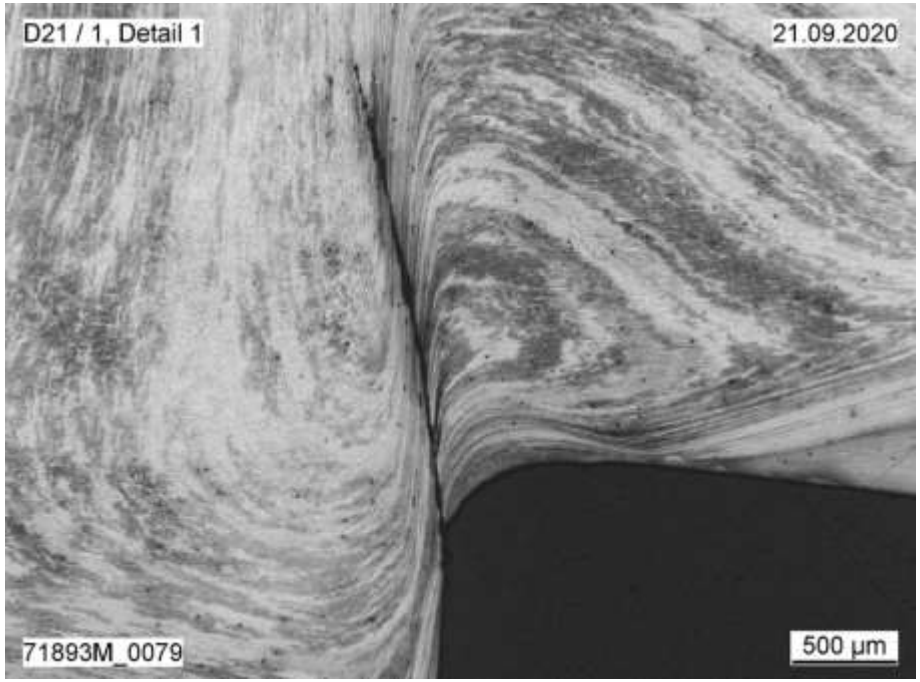
MOOR SchadensManagement
Das Kompetenzzentrum für SchadensAnalysen

Phase 3
Schraube D21 - Typ: Schrott
Zustand nach Ausbau



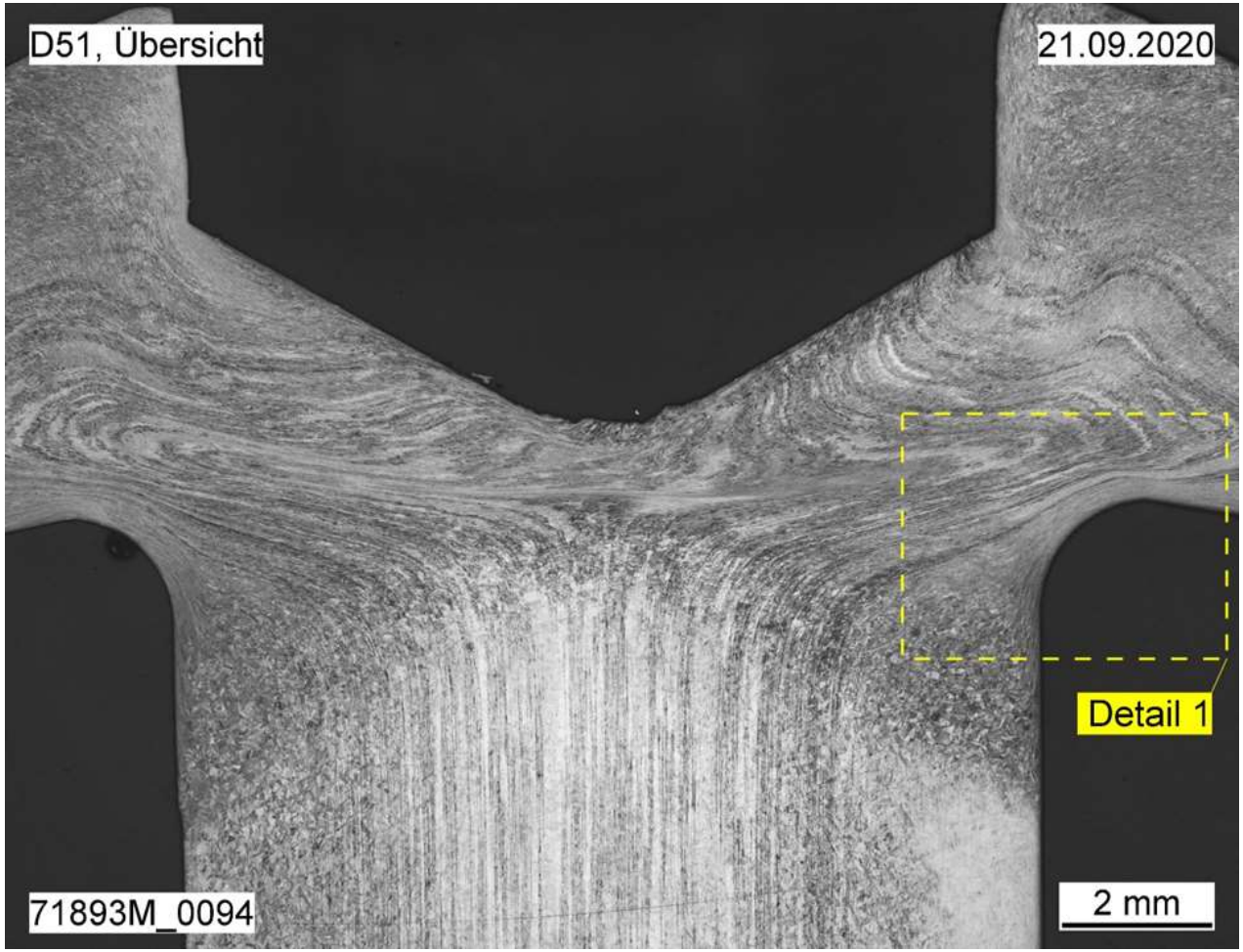
MOOR SchadensManagement
Das Kompetenzzentrum für SchadensAnalysen

Phase 3
Schraube D21 - Typ: Schrott
Zustand nach Ausbau



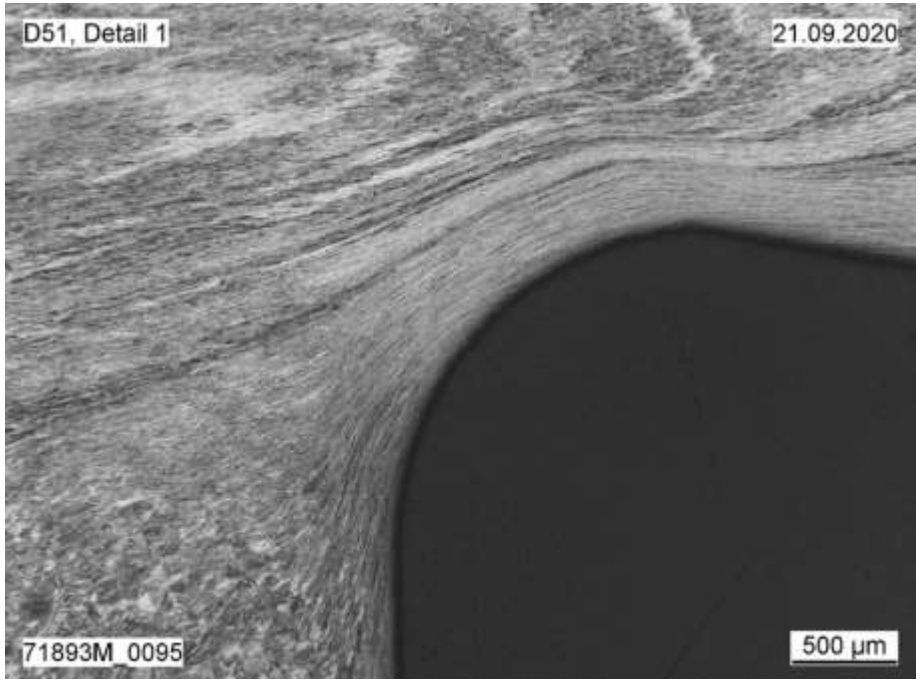
MOOR SchadensManagement
Das Kompetenzzentrum für SchadensAnalysen

Phase 3
Schraube D51
Zustand nach Ausbau



MOOR SchadensManagement
Das Kompetenzzentrum für SchadensAnalysen

Phase 3
Schraube D51
Zustand nach Ausbau



MOOR SchadensManagement
Das Kompetenzzentrum für SchadensAnalysen

mögliche Ursachen - Schadensfall 2

Kopfbrüche - Schrauben mit grossem Kopfdurchmesser
Lagertank für flüssiges Gärgut

Technik

- Konstruktionsprinzip nicht bekannt
- Ungenügende Vorgaben zu den mechanischen Eigenschaften
- Keine Vorgaben zur Herstellung

Einkauf

- Einkauf ohne Vorgaben:
  - zu mechanischen Eigenschaften
  - zur Herstellung
- Einkauf nach günstigstem Angebot

Qualitätssicherung

- Eingangskontrollen
  - Nicht oder nicht ausreichend kontrolliert
  - Prüfungen so angelegt, dass mangelhafte Eigenschaften im Übergang Kopf zu Schaft nicht entdeckt wurden

MOOR SchadensManagement
Das Kompetenzzentrum für SchadensAnalysen

Systematische Schadensanalyse

Eine Maschine mit «Ihren» Spezialschrauben stürzt ab.

Gefragt ist dann:
eine
Systematische Schadensanalyse nach der Richtlinie VDI 3822

- Ermittlung der wirklichen Schadensursachen
- Nur weil «Ihre» Schrauben allenfalls Mängel aufweisen bedeutet dies nicht, dass «Ihre» Spezialschrauben die Ursache für den Absturz sind.

MOOR SchadensManagement
Das Kompetenzzentrum für SchadensAnalysen

Kompetenz und Erfahrung in

Schadensanalytik & Werkstofftechnik

MOOR SchadensManagement GmbH

Alte Spinnerei 9

CH-5210 Windisch

Tel. Geschäft: +41 56 450 28 50

Tel. Home Office: +41 56 442 22 41

moor @ moorschaden.ch

Herzlichen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

MOOR SchadensManagement
Das Kompetenzzentrum für SchadensAnalysen