



Matthias Karl, BSc.

Abgleich Bauteilerprobung zur Festigkeitsberechnung

Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades
Diplom- Ingenieur

Masterstudium Maschinenbau

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Ass. Prof. Dipl.- Ing. Dr. Christian Moser

Institut für Maschinenelemente und Entwicklungsmethodik

Graz, November 2017

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

Datum

Unterschrift

Abstract

Abgleich Komponentenerprobungen zur Festigkeitsberechnung

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Komponentenerprobungen, die im Bereich Fahrzeugantriebssysteme im Laufe von Produktentwicklungen und Umstellungen in laufenden Serienproduktionen angefallen sind, mithilfe von Methoden der Festigkeitsberechnung nachgerechnet und verglichen. Durch Komponentenerprobungen auf Pulsprüfständen und anschließende werkstofftechnische Analysen wurden Art und Höhe der Belastung, ertragene Anzahl an Lastwechseln bis Bruch und darauffolgend Kernhärte, Oberflächenhärte und Einhärtetiefe nahe der Bruchstelle ermittelt. Diese Daten bildeten den Berechnungsinput für Versuchsnachrechnungen. Hierdurch wurden rechnerische Sicherheiten gegenüber den tatsächlich ertragenen Lasten ermittelt.

Die eingesetzten Berechnungsmethoden waren dabei Formen der pauschal gehaltenen, schnell anwendbaren Methode nach Nennspannungskonzept in Anlehnung an die FKM Richtlinie und aufwändigere Ansätze wie örtliche Beurteilungen in linear- elastischen FE- Modellen.

Im Zuge dessen wurden einerseits Dokumentationen zu bereits abgeschlossenen Erprobungen aufgearbeitet und nachgerechnet sowie all jene Komponentenerprobungen, die während der Entstehungszeit der Diplomarbeit anfielen aktiv betreut, analysiert und ebenfalls nachgerechnet. Die zu betrachtenden Komponenten umfassten dabei nichtgeschweißte, zum allergrößten Teil randschichtverfestigte Getriebewellen und alle Arten von wellenartigen Antriebsstrangkomponenten.

Ziel der Arbeit sind Aussagen über zu erwartende Abweichungen zwischen den betrachteten Berechnungsmethoden gegenüber den Prüfstandsergebnissen real erprobter Komponenten. Die Abweichungen wurden zahlenmäßig erfasst und ihre Ursachen diskutiert. Darauf aufbauend wurden Empfehlungen für die Anwendung der Berechnungsmethoden und gegebenenfalls, sofern sinnvoll und möglich, Verbesserungsvorschläge für diese erarbeitet.

Insgesamt wurden schlussendlich etwa 30 Erprobungen für die Nachrechnungen verwendet.

Abstract

Comparison of Component Testing to Strength Calculation

In the course of this elaboration, component tests which were done for process and development verification in the area of vehicle powertrain engineering and manufacturing were recalculated using established methods of component strength calculation. The results were then compared. By component tests on test benches and subsequent material analyses, type and amplitude of load, amount of load cycles until failure and subsequently core hardness, surface hardness and hardening depth near to the area of fracture were obtained. This data generated the calculation input for test recalculations. Through that, calculative factors of safety, respectively degrees of utilization, were calculated.

The utilized calculation methods ranged from the general, relatively quickly to be done concept of nominal tension in the way given by the FKM Guideline to more time- consuming methods of local assessments in linear- elastic FE models.

For that, on the one hand documentation to already enclosed test data was reclaimed and recalculated and on the other hand all component tests which took place in the period of time of this project were actively taken care of, analyzed and also recalculated. The considered components are non- welded, in large part hardened drive shafts and shaft- like components of vehicle powertrain systems.

Targets are statements concerning deviations to be expected between calculation methods and component test bench results of real existing components. The deviations were quantified and their causes discussed. Building on that, ideas for the use of the methods and, where appropriate and possible, suggestions for improvements were given.

About 30 test procedures were eventually used for these recalculations.

Inhaltsverzeichnis

1. Beschreibung des Umfelds und der Idee zur Arbeit	1
2. Aufgabenstellungen und Ziele	2
3. Charakterisierung der Bauteile.....	4
4. Verwendete Berechnungswerkzeuge und ihr derzeitiger Einsatz	7
5. Der Ablauf von Bauteilerprobungen.....	11
6. Werkstofftechnische Analysen	16
7. Beschreibung der Durchführung von Versuchsnachrechnungen allgemein	19
KISSsoft.....	19
FEMFAT	20
Werkstoffkennwerte	21
8. Über die Durchführung von Versuchsnachrechnungen bei rotationssymmetrischen Kerben unter statischer Belastung	22
9. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei rotationssymmetrischen Kerben unter statischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge	24
Diskussion der Ergebnisse	56
10. Über die Durchführung von Nachrechnungen statischer Erprobungen bei zyklisch symmetrischen Kerben: Steckverzahnungen	62
11. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei zyklisch symmetrischen Kerben unter statischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge: Steckverzahnungen	65
Diskussion der Ergebnisse	104
12. Erfassung des Einflusses der Modellierung bei 3D Kerben	110
13. Über die Durchführung von Nachrechnungen dynamischer Erprobungen.....	112
14. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei dynamischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge.....	114
Diskussion der Ergebnisse	157
15. Zusammenfassung der Ergebnisse	160
16. Aus den Abgleichen abgeleitete Empfehlungen für das Vorgehen bei zukünftigen Berechnungen	161
17. Vorschläge für weitere Erarbeitungen auf diesem Gebiet	163
Verwendete Abkürzungen.....	164
Abbildungsverzeichnis	165
Quellenangaben und Literaturverzeichnis	170

1. Beschreibung des Umfelds und der Idee zur Arbeit

Die vorliegende Arbeit entstand an der Technischen Universität Graz am Institut für Maschinenelemente und Entwicklungsmethodik in Kooperation mit dem Unternehmen Magna Powertrain in der Entwicklungsabteilung für Simulation und Betriebsfestigkeitsberechnungen und den Abteilungen für Betriebsfestigkeitserprobungen und Werkstofftechnik. Der im Süden von Graz angesiedelte Standort des Unternehmens Magna ist spezialisiert auf die Entwicklung und Produktion von Fahrzeugantriebssystemen, wobei hier wiederum die Kernkompetenzen im Bereich der Verteilergetriebe für Allradfahrzeuge, der Vorder- und Hinterachsgetriebe und der Kupplungssysteme liegen. Wie in der Automobilindustrie üblich, werden entwickelte Produkte in Großserien mit üblicherweise mehreren Hunderttausend Stückzahlen produziert. Entwicklung und Produktion befinden sich hier am selben Werksgelände. [4]

Im Rahmen laufender Serienproduktionen fallen regelmäßig Prozessumstellungen an. Das umfasst beispielsweise Änderungen von Prozessparametern, Inbetriebnahmen neuer Anlagen oder die Einbindung neuer Lieferanten für die Herstellung oder Teilfertigung von Komponenten. Üblicherweise werden die ersten Produkte solcher Prozessumstellungen zur Erfassung und Sicherstellung ihrer geforderten Qualität vor Freigabe der Umstellung hinreichend umfangreich erprobt.

Im Falle von Getriebewellen umfasst dies ein standardisiertes Erprobungsprogramm an statischen und dynamischen Erprobungen. Durch statisches Abdrehen (steigende Torsionsbelastung bis Bruch) wird das Drehmoment, ab dem plastische Verformungen deutlich messbar sind und zu Funktionseinschränkungen führen können, sowie das Maximalmoment ermittelt, welches kurz vor oder bei Bruch erreicht wird. Durch dynamische Erprobungen wird in weiterer Folge auf Wöhlerlinien geschlossen, über die wiederum Aussagen bezüglich zu erwartendem Ermüdungsbruch getroffen werden. Im Falle von Prozessänderungen lautet das Entscheidungskriterium meist entweder, dass die neuen Komponenten bessere oder vergleichbare Ergebnisse liefern wie die der aktuellen Serie, oder, dass die Ergebnisse in Gegenüberstellung zu einem geforderten Belastungskollektiv und Mindestwerten an Bruchmoment und dem Einsetzen plastischer Verformung ausreichend hoch sind.

Auch im Rahmen von Entwicklungsprozessen fällt für abgesicherte Aussagen bezüglich der Betriebsfestigkeit einzelner Komponenten oft eine Vielzahl an Erprobungen an.

Die Idee der vorliegenden Arbeit ist es, die Ergebnisse dieser anfallenden Komponentenerprobungen nicht nur für ihren eigentlichen, erwähnten Zweck der Verifikation zu nutzen, sondern die Ergebnisse zum Zwecke des Erfahrungsgewinns über die im Unternehmen angewandten rechnerischen Methoden der Festigkeitsbeurteilungen zu verwenden. Hierfür wurden Erprobungen betreut, die Erprobungsergebnisse aufgearbeitet und unter Zuhilfenahme dieser Daten Versuchsnachrechnungen durchgeführt.

2. Aufgabenstellungen und Ziele

Ausgehend von dieser Idee wurden Aufgaben und Ziele für die vorliegende Arbeit ausgearbeitet. Hauptaugenmerk soll auf dem Erfahrungsgewinn über die rechnerischen Methoden liegen, welche üblicherweise in den Produktentwicklungsprozessen angewandt werden.

Durch diese Arbeit soll demnach in erster Linie Erfahrung darüber gewonnen werden, wo es genau zu Abweichungen zwischen den Ergebnissen der betrachteten Berechnungsmethoden und dem Versuch kommt und wo hingegen die Methoden in ihrer jetzigen Form gut mit den Bauteilerprobungen zusammenpassen. Ausgehend davon sollen Verbesserungspotentiale aufgezeigt werden und Vorschläge gemacht werden, wie diese eingebracht werden könnten.

Die konkreten Ziele wurden wie folgt definiert.

Die Abweichungen sollen in Zahlen gefasst werden.

Hierfür werden in Versuchsnachrechnungen rechnerische Sicherheiten gegen die tatsächlich im Versuch ertragenen Belastungen ermittelt. Der Begriff „rechnerische Sicherheit“ ist hier nicht ganz im Einklang mit den entsprechenden Begriffen in Berechnungsmethoden wie der FKM Richtlinie, in deren Anlehnung die Berechnungen durchgeführt werden. Darin werden im Gegensatz dazu Auslastungsgrade mit bereits im Festigkeitsnachweis berücksichtigten Sicherheitsfaktoren ermittelt. Die Konvention bei MPT Lannach, welche auch für diese Arbeit übernommen wurde, ist die Bildung des Kehrwerts dieses Auslastungsgrades, wenn alle Sicherheitsfaktoren, die in den Nachweisen gefordert werden, zu Eins gesetzt werden.

Im Zuge dieser Versuchsnachrechnungen sollen einerseits anfallende Komponentenerprobungen am Standort betreut werden, um einen Einblick in den Prüfstandsbetrieb und die Problemstellungen in diesem Bereich kennenzulernen. In werkstofftechnischen Analysen, die im Anschluss an die Pulserprobungen an ausgewählten, erprobten Bauteilen durchgeführt werden, werden Materialkennwerte ermittelt, die dann in der Berechnungsmethodik vorgegeben werden. Dazu zählen Kernfestigkeit, Oberflächenfestigkeit und Einhärtetiefe. Auf diese Festigkeitswerte wird als Berechnungsparameter anhand der ermittelten Härtemessungen nach derzeit gültiger Norm, DIN EN ISO 18265 [2], geschlossen. Im Anschluss daran werden Berechnungsmodelle in KISSsoft (für das Nennspannungskonzept) und Abaqus (für spätere Auswertung mittels örtlichen Konzepts in FEMFAT) für die tatsächlich in der Erprobung aufgetretenen Bruchstellen erstellt. In der im Anschluss durchgeführten Auswertung werden die ermittelten Festigkeits-Istwerte in die Rechnung eingebracht. In den Rechenmodellen soll mit tatsächlich im Versuch ertragenen Lasten belastet werden. Hierfür wird bei der Nachrechnung quasistatischer Erprobungen das im Versuch ermittelte Maximalmoment verwendet, bei dynamischen Erprobungen wird mit einer Momentenamplitude gerechnet, die sich für eine bestimmte Referenzlastwechselzahl aus der im Versuch ermittelten Wöhlerlinie ergibt. Die sich somit ergebende rechnerische Sicherheit gegen den tatsächlich im Versuch aufgetretenen Bruch wird dokumentiert und zur Vergleichbarkeit in zusammenfassenden Diagrammen grafisch dargestellt, um Tendenzen der Berechnungsmethoden feststellen und darauffolgend diskutieren zu können.

2. Aufgabenstellungen und Ziele

Ausgehend von den Auswertungen sollen Empfehlungen für zukünftige Berechnungen in Produktentwicklungsprozessen diskutiert werden. Außerdem wird auf mögliche Verbesserungsvorschläge zur Weiterentwicklung der Methoden, falls notwendig und möglich bzw. sinnvoll, gegeben.

Anhand der Aufarbeitung der Versuche soll eine Datenbasis für zukünftige Auslegung ähnlicher Bauteile bzw. Kerben geschaffen werden.

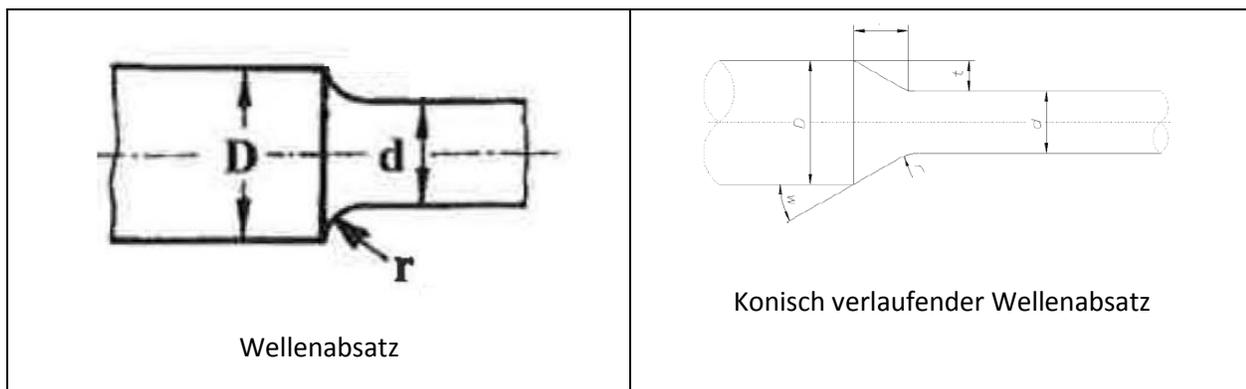
Die betreuten Versuche und deren Daten und Kennwerte zur Bruchstelle werden aufgearbeitet, dokumentiert und in einer Datenbank gesammelt. Sie wird sich möglicherweise für zukünftige Auslegungen als nützlich erweisen. Dokumentiert werden Nenndurchmesser, Kerbform, nähere Infos zur Kerbstelle und tatsächlich nach Erprobung gemessene Härte- Istwerte. Gemeint sind hier Kernhärte, Oberflächenhärte und Einhärtetiefe, möglichst nahe an der Bruchstelle gemessen. Darüber hinaus wird die ertragene Belastung im Versuch und bei dynamischen Erprobungen die Wöhlerliniensteigung dieser Kerbform dokumentiert.

3. Charakterisierung der Bauteile

Bei den untersuchten Bauteilen handelt es sich grundsätzlich um Getriebewellen und allen Arten von wellenartigen Komponenten aus dem Fahrzeugantriebsstrang für PKW. Ein großer Teil der erprobten und nachgerechneten Komponenten stammt aus laufenden Serienproduktionen. Die restlichen betrachteten Teile wurden im Rahmen von Produktentwicklungsprojekten erprobt. Sie sind aus typischen Vergütungs- und Einsatzstählen gefertigt, die im Fahrzeugantriebsstrang typischerweise beliebt zum Einsatz kommen. Beispiele hierfür sind etwa: C45E, 20MnCr5, 28MnCrB5-2, 42CrMo4, 41CrS4. Diese liegen üblicherweise in grundsätzlich vergütetem Zustand vor und werden bei Bedarf nach der Formgebung durch Einsatz- oder Induktionshärten randschichtverfestigt. Typische zum Einsatz kommende Formgebungsprozesse der Produktion sind je nach Geometrie und je nachdem, ob es sich um Teile der Serie oder um Prototypen handelt, Schmieden und / oder Drehen. Steckverzahnungen als Welle / Nabe- Verbindungen zur Übertragung von Drehmoment werden in Großserienproduktionen üblicherweise eingewalzt, für Prototypenerprobungen auch gefräst.

Um den Umfang der Arbeit einzuschränken, wurden nur nichtgeschweißte Bauteile untersucht, bzw. Bauteile, deren Versagensstelle im Versuch hinreichend weit weg von vorhandenen Schweißnähten lag, um einen relevanten Einfluss dieser ausschließen zu können. Bei den Versagensstellen handelt es sich somit Großteils um typische Kerben von Getriebewellen, wie allen Arten von umlaufenden Einstichen für Sicherungsringe (runde oder rechteckförmige Ausführungen), Wellenabsätzen (konisch verlaufend, senkrecht zur Drehachse, mit und ohne Freistich) oder Steckverzahnungen.

Eine Auswahl dieser typischen Kerbformen sollen in den folgenden Abbildungen gezeigt werden.



3. Charakterisierung der Bauteile

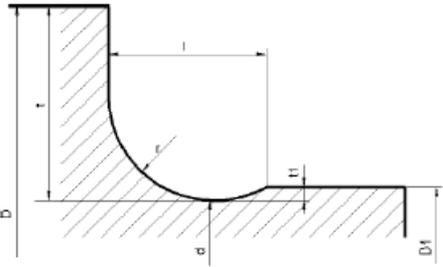
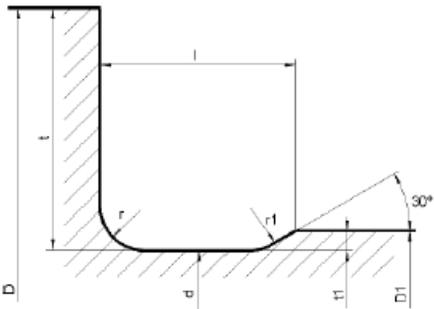
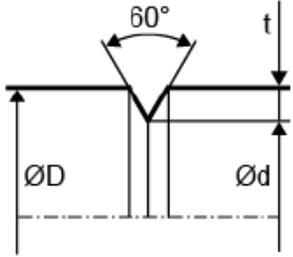
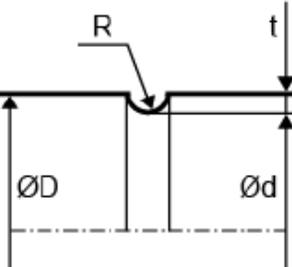
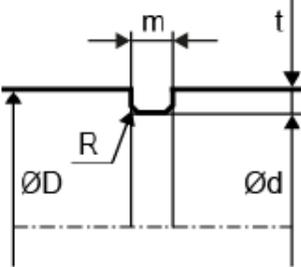
 <p>Wellenabsatz mit Freistich, Form D nach DIN 509</p>	 <p>Wellenabsatz mit Freistich, Form B nach DIN 509</p>
 <p>Spitzer, umlaufender Einstich</p>	
 <p>Runder, umlaufender Einstich</p>	 <p>Rechteckförmiger, umlaufender Einstich</p>

Abbildung 1: Typische umlaufende Kerben an Getriebewellen, entnommen aus [1] und [10]



Abbildung 2: Steckverzahnung



Abbildung 3: Schmierbohrung

Abbildung 4: Nicht- rotationssymmetrische, unter Umständen aber zyklisch symmetrische Kerbformen

4. Verwendete Berechnungswerkzeuge und ihr derzeitiger Einsatz

Für die Festigkeitsbewertung von Getriebewellen steht grundsätzlich eine Vielzahl an Methoden und Verfahren zur Verfügung. Die hauptsächlich für die betrachteten Bauteile relevanten bzw. in Frage kommenden Methoden lassen sich pauschal in zwei etablierte Konzepte unterteilen: dem Nennspannungskonzept und dem Konzept der örtlichen Beurteilung. [20]

Grundgedanke des Nennspannungskonzepts ist es, einerseits die Nennspannungen, die für einen sinnvoll zu definierenden Querschnitt durch Methoden der elementaren oder höheren Festigkeitslehre bzw. technischen Mechanik errechnet werden, mit Faktoren zu beaufschlagen, die Einflüsse auf diese, wie Spannungsüberhöhungen am betrachteten Querschnitt, berücksichtigen sollen. Diese werden der Bauteilfestigkeit gegenübergestellt, welche aus tabellierten Festigkeitswerten genormter Prüfkörper bzw. Proben errechnet werden, die ihrerseits ebenfalls mit Faktoren beaufschlagt werden, um den Unterschied zwischen Proben- und Bauteilfestigkeit zu erfassen. Da dies ein Konzept ist, welches bei konstruktionsbedingt in Getriebewellen immer wieder vorkommenden geometrischen Kerben effizient automatisiert werden kann und somit wenig zeitlichen Aufwand erfordert, wird es gerne vor allem für überschlägige Auslegungen in Konzeptphasen von Produktentwicklungsprozessen eingesetzt. Typische hiermit standardmäßig bewertbare Kerben sind Wellenabsätze, Schmierungsquerbohrungen oder Welle-Nabe- Verbindungen und Einstiche, beispielsweise für Sicherungsringe. [1]

Grundsätzlich oft mit höherem Aufwand verbunden, aber in vielen Fällen einzig sinnvolle Methode ist die Festigkeitsbewertung nach dem Konzept der örtlichen Spannungen. Dabei werden örtlich an diskreten Punkten vorliegende Spannungen üblicherweise mithilfe der Methode der finiten Elemente unter Zuhilfenahme eines linear- elastischen Materialmodells ermittelt. Diese Spannungen sind damit nicht mehr an einen zu definierenden Querschnitt gebunden, was dieses Konzept für komplexere Geometrien oft zur einzig sinnvollen Wahl macht. Darüber hinaus ist sie die Methode der Wahl, wenn Sonderformen von Kerben an Getriebewellen bezüglich ihrer Festigkeit beurteilt werden müssen, für die somit keine Formzahlen und Kerbfaktoren durch die Literatur und Erfahrung mehr zur Verfügung stehen. [1]

Im Folgenden soll genauer auf diese beiden Konzepte und ihrer Umsetzung in den Softwarepaketen KISSsoft (für das Nennspannungskonzept) und FEMFAT (für das Konzept der örtlichen Beurteilung) eingegangen werden.

Festigkeitsberechnung nach dem Nennspannungskonzept in Anlehnung an die FKM- Richtlinie und ihre Umsetzung in KISSsoft

Eine der modernsten und auch bei MPT Lannach eingesetzten Formen des Festigkeitsnachweises mittels Nennspannungskonzepts ist jene in Anlehnung an die FKM Richtlinie in ihrer derzeit aktuellsten Fassung

(Ausgabe 6) von 2012 [1] [20]. Der im vollen Namen genannte „Rechnerische Festigkeitsnachweis von Maschinenbauteilen“ wurde vom Forschungskuratorium Maschinenbau herausgegeben.

Darin führt die Beaufschlagung der Werkstoff- Festigkeitskennwerte, welche in den enthaltenen Tabellen für eine statistische Überlebenswahrscheinlichkeit von 97,5% vorliegen, mit verschiedenen Konstruktionskennwerten im ersten Schritt zu einer Bauteil- Wechselfestigkeit. Zu erwähnen sind hierbei etwa Faktoren wie der Konstruktionsfaktor, der sich seinerseits beispielsweise aus Kerbwirkungszahl, Stützzahlen, Rauheitsfaktor, Randschichtfaktor oder Schutzschichtfaktor zusammensetzt. Durch weitere Berücksichtigung einer Mittelspannungsempfindlichkeit durch einen Mittelspannungsfaktor wird die Bauteil- Dauerfestigkeit für schwingende Belastungen auf bestimmten Mittelspannungen errechnet. Ist weniger die Dauerfestigkeit von Interesse, sondern soll eine Betriebsfestigkeit bzw. ein Zeitfestigkeit für begrenzte Lebensdauer ermittelt werden, bietet die Richtlinie die Möglichkeit der Beaufschlagung mit einem höher als 1 werdenden Betriebsfestigkeitsfaktor, der sich aus pauschalen Annahmen zur Wöhlerliniensteigung ergibt. Nach Berücksichtigung von Sicherheitsfaktoren, welche abhängig von Schadensfolgen, der Durchführung regelmäßiger Inspektionen und der Gewissheit bezüglich Lastannahmen gemacht werden, wird die Bauteil- Betriebsfestigkeit mit den Spannungskennwerten ins Verhältnis gesetzt. Daraus resultiert ein rechnerischer Auslastungsgrad (oft mit dem Faktor 100 multipliziert und somit in % angegeben). Ist dieser errechnete Auslastungsgrad kleiner 1 bzw. kleiner 100%, ist der Nachweis der Festigkeit an dieser Kerbstelle erfolgreich erbracht. Diese kann damit als in Ordnung beurteilt werden. Nicht unerwähnt bleiben sollte, dass ein Ermüdungsfestigkeitsnachweis nach FKM- Richtlinie auch unbedingt einen zusätzlich durchzuführenden statischen Nachweis erfordert. Die höhere der beiden Auslastungen ist ausschlaggebend. [1]

Bei KISSsoft handelt es sich um eine Berechnungssoftware für ein breit gefächertes Spektrum an Anwendungsgebieten des Maschinenbaus, welches auch bei MPT zur Anwendung kommt und einen Festigkeitsnachweis in Anlehnung an die oben beschriebene Form des Festigkeitsnachweises nach Nennspannungskonzept in Anlehnung an die FKM Richtlinie enthält. Relevant für die vorliegende Arbeit ist das Wellenberechnungsmodul. Darin sind neben dem Nachweis in Anlehnung an die FKM Richtlinie auch weitere Normen und Richtlinien für Festigkeitsnachweise nach dem Nennspannungskonzept implementiert. Dies umfasst auch Festigkeitsnachweise nach DIN 743 und der Methode nach Hänchen und Decker. [3]

In KISSsoft bzw. in der Berechnungsabteilung bei MPT Lannach, in der diese Arbeit verfasst wurde, wird das beschriebene Vorgehen beim Festigkeitsnachweis nach FKM Richtlinie modifiziert. Hier soll das Berechnungsergebnis anstatt des Auslastungsgrads eine quasi- Sicherheit sein. Im Zuge dessen werden alle durch die FKM- Richtlinie vorgeschlagenen Sicherheitsfaktoren auf 1 gesetzt und die mindestens geforderte Sicherheit, die dann den Kehrwert des errechneten Auslastungsgrads bildet, nach Bedarf und Anwendungsfall im Ausgleich hierzu entsprechend höher angesetzt. Es wird hier somit nicht von Auslastungsgraden gesprochen, sondern von Sicherheiten. Diese Konvention wurde auch für diese Arbeit und die daraus resultierenden Ergebnisse übernommen. [3]

4. Verwendete Berechnungswerkzeuge und ihr derzeitiger Einsatz

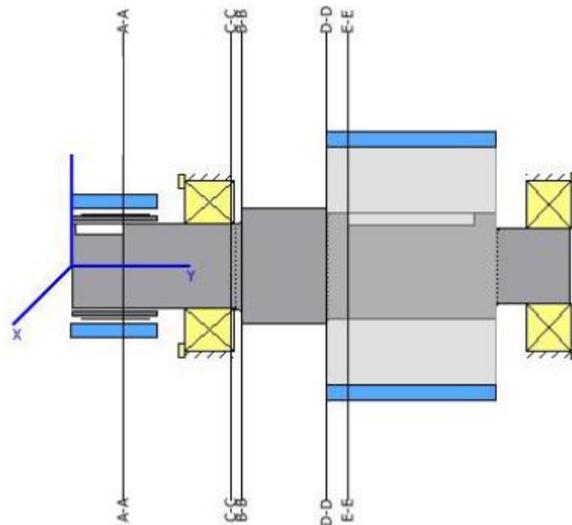


Abbildung 5: Beispiel eines KISSsoft Modells einer Getriebewelle

Festigkeitsberechnung nach dem Konzept der örtlichen Spannungen und ihre Umsetzung in FEMFAT

Idee des Konzepts der Festigkeitsbewertung anhand örtlicher Spannungen ist es, die Spannungen nicht mehr nach Methoden der elementaren technischen Mechanik für einen bestimmten Querschnitt zu ermitteln, sondern von der Methode der finiten Elemente Gebrauch zu machen. Bezogen auf die Praxis wird hierin die 3D Geometrie, die üblicherweise in Form eines 3D- CAD- Files vorliegen muss, mithilfe dafür entwickelter Softwarepakete in eine endliche Anzahl diskreter Elemente, welche an ihren Knotenpunkten miteinander verbunden sind, unterteilt. Die Belastungsfälle werden modelliert, indem sinnvoll und möglichst realitätsnah ausgewählten Knoten, trotzdem möglichst weit weg von späteren Auswertepunkten, Randbedingungen und Belastungen aufgezwungen werden. Das dadurch entstehende Modell wird einem Solver („Gleichungslöser“) übergeben, der die für die Lösung der Gleichgewichtsbedingungen notwendigen Gleichungen generiert und numerische Lösungen errechnet. Für die Praxis schlussendlich relevantes Ergebnis dieser Rechnungen sind hauptsächlich die Spannungen in den Knotenpunkten. Bei Festigkeitsbewertungen mithilfe dieser Methode werden ausgehend von den Ergebnissen in den einzelnen Knotenpunkten Festigkeitsnachweise in ebendiesen diskreten Punkten geführt, nicht mehr für einen ganzen Querschnitt, wie es beim Nennspannungskonzept der Fall ist. Die Spannungsüberhöhung in Kerbgründen ist somit durch diese Vorgehensweise in den erhaltenen FE- Ergebnissen bereits berücksichtigt. [20]

FEMFAT ist ein vom Engineering Center Steyr entwickeltes Softwarepaket zur Betriebsfestigkeitsbewertung anhand ebendieser örtlichen Spannungen in FE- Knoten, die ausgehend von einem bereits vorliegenden FE- Ergebnisfile eingelesen werden. Der Name leitet sich von „Finite Element Method Fatigue“ ab. Damit wird die Möglichkeit geboten, auch auf die Betriebsfestigkeit komplexer Strukturen von Bauteilen einzugehen, bei denen sich kein sinnvoller Querschnitt für eine Analyse nach Nennspannungskonzept mehr definieren ließe. Es kann somit im Gegensatz zu KISSsoft nicht mehr nur für die Festigkeitsbewertung von Getriebewellen verwendet werden, sondern von sämtlichen Bauteilen, für die eine Festigkeitsbewertung als sinnvoll oder notwendig erachtet wird. Zudem kann hiermit auch auf unkonventionelle Kerbformen von Wellen eingegangen werden, für die keine Formzahlen, Kerbfaktoren etc. in den Berechnungsrichtlinien nach Nennspannungskonzept vorgeschlagen werden. [5]

Für Festigkeitsbewertungen gegen auftretende maximale statische Belastungen wird vom „FEMFAT Break“- Modul Gebrauch gemacht. Eingelesen wird ein FE- Ergebnisfile, welches mithilfe der Methode der finiten Elemente errechnete Spannungen in Knotenpunkten des Modells enthält, in dem die maximal auftretenden bzw. möglichen Betriebslasten oder Belastungen durch Sonderereignisse als Lasten angesetzt wurden.

Bei der „Endurance“- Rechnung, also dem Festigkeitsnachweis gegen Ermüdung wird mit schädigungsäquivalenten Belastungen, die ein gefordertes Belastungskollektiv repräsentieren sollen, gearbeitet. Diese werden üblicherweise nach den Hypothesen der linearen Schadenakkumulation, etwa nach Palmgren und Miner, oder deren Modifizierungen, etwa nach Haibach, ermittelt. [20]

Die Auswertung nach FEMFAT orientiert sich Großteils am örtlichen Konzept, welches durch die FKM Richtlinie [1], Kapitel 3 und 4, beschrieben wird. Allerdings bleibt es dem Benutzer offen, aus einer Vielzahl an Möglichkeiten zu wählen, nach welchen Berechnungsvorschriften einzelne, eventuell zusätzliche Einflussfaktoren errechnet werden sollen. Zugrundeliegende Werkstoffmodelle können manuell eingelesen werden oder durch einen Materialgenerator generiert werden. Für Auslegungen wird normalerweise auf eine umfangreiche mitgelieferte Materialdatenbank zugegriffen.

Durch die Art der Methodik ist der Zeitaufwand, bis schlussendlich ein Ergebnis einer Festigkeitsbewertung vorliegt, üblicherweise aufgrund des Modellierungsaufwands, je nach Geometrie und Modellkomplexität, höher. Wie bereits erwähnt, ist dies aber in vielen Fällen die sinnvollere bzw. einzig sinnvolle Methodik. [21] [20]

5. Der Ablauf von Bauteilerprobungen

Mithilfe von Betriebsfestigkeits- Bauteilerprobungen wird in späteren Produktentwicklungsprozessen üblicherweise die geforderte Komponenten- oder Systemfestigkeit auf Prüfständen verifiziert. Systemerprobungen können auch bereits in konkreten Fahrzeugprototypen erfolgen. Einen großen Vorteil von Komponentenerprobungen bildet die Tatsache, dass die Prüfstände zur Betriebsfestigkeitsprüfung relativ schnell und simpel gehalten werden können und sich die Aufwände im Gegensatz zu etwa Systemerprobungen in relativ überschaubaren Grenzen halten.

Mit vergleichsweise wenig Prüfstands-ausrüstung kann der Prüfaufbau bei statischen Erprobungen gestaltet werden. Das grundsätzliche Konzept bildet hierbei ein Aufbau bestehend aus einem Servomotor zur Drehmomenterzeugung, gefolgt (im Sinne des Momentenflusses) von einem Übersetzungsgetriebe, welches üblicherweise für das Erreichen der hohen erforderlichen Drehmomente notwendig wird. Der Prüfkörper wird mit Hilfe von Adaptern auf der Eintriebsseite mit diesem verbunden und auf der anderen Seite durch eine Einspannung in seiner Rotation um die Längsachse gehindert. In fast allen Anwendungsfällen bei MPT Lannach findet die Momentenein- und -ausleitung bei Erprobungen von Getriebewellen konstruktionsbedingt durch Steckverzahnungen statt, wodurch in den Adaptern die Gegenverzahnung abgebildet wird. Grundsätzlich wird versucht, die Prüfaufbauten in Relation zum Prüfling steif zu gestalten, um bei Messungen der Komponentensteifigkeit, welche hierdurch unter anderem ermittelt werden soll, Einflüsse auf die Messung durch Verformung des Aufbaus möglichst gering zu halten. Idealerweise erfolgt eine Verdrehwinkel-messung mithilfe eines Seilwegaufnehmers, der beispielsweise über den größeren Durchmesser des Adapters läuft. Sinn der Befestigung am größeren Durchmesser ist, dass das Seil zur Messung bei Verdrehung des Adapters einen größeren Weg zurücklegt, was theoretisch in geringerem Messfehler resultiert. Eine grundlegende Frage bei Messungen zur Steifigkeit sollte immer sein, was hierbei alles, abgesehen von der gewünschten Messung der Komponentensteifigkeit, unweigerlich mitgemessen wird. Durch Messung des Verdrehwinkels direkt am Prüfling oder am zugehörigen Adapter wird dieses Problem im Normalfall hinreichend gut gelöst.

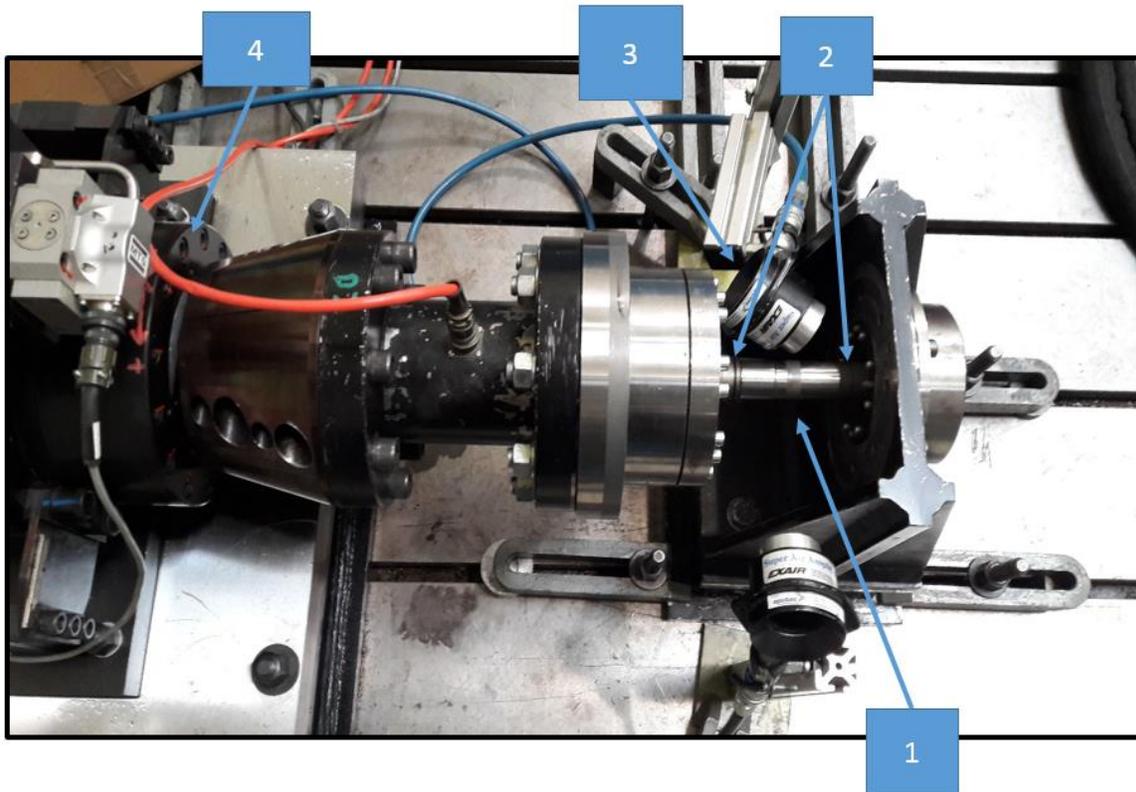


Abbildung 6: Prüfaufbau schematisch

Legende zur Abbildung:

1 ... Prüfling

2 ... Einspannung durch Adapter

3 ... Kühlung für dynamische Erprobungen

4 ... Servomotor (bei quasistatischen Erprobungen) oder Drehzylinder (bei dynamischen Erprobungen)

5. Der Ablauf von Bauteilerprobungen

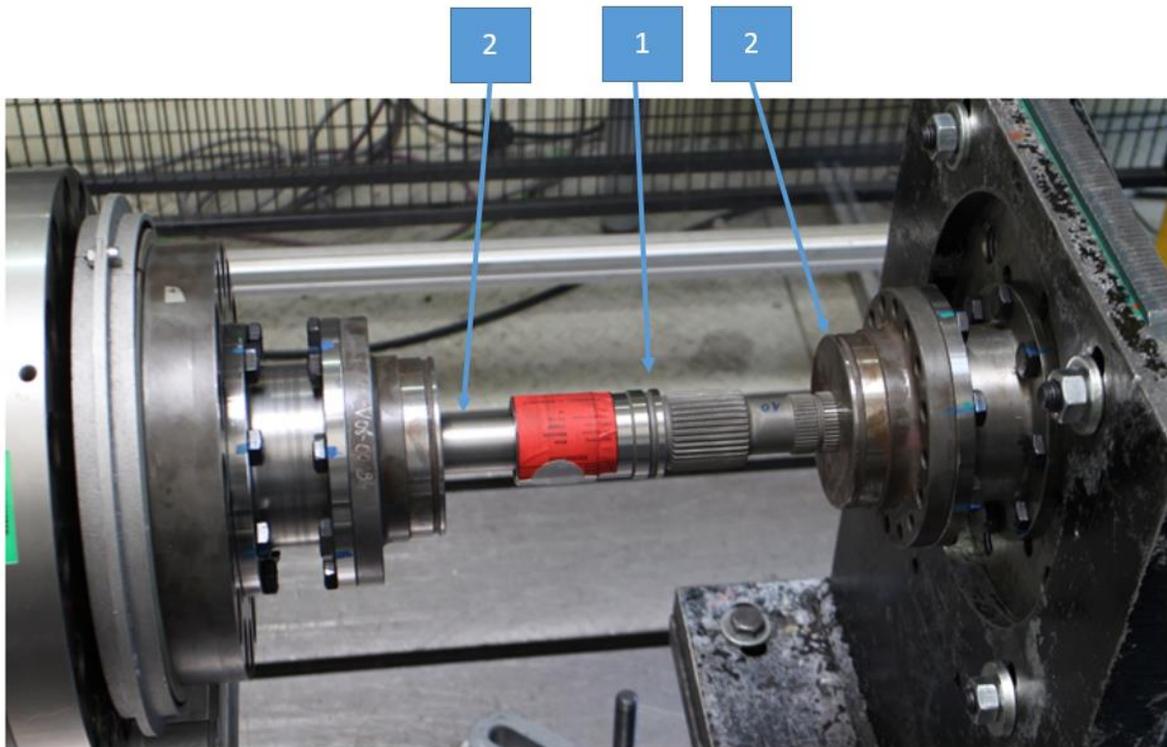


Abbildung 7: Prüfaufbau Detail

Legende zur Abbildung:

1 ... Prüfling

2 ... Adapter mit Gegenverzahnung

Gewünschtes Ergebnis einer statischen Erprobung bildet im Endeffekt ein Diagramm von Moment über Verdrehwinkel, aus dem Aussagen über die Verdrehsteifigkeit, den Beginn plastischer Verformung und das Maximal- und Bruchmoment der Komponente bei reiner Torsionsbelastung abgeleitet werden können. Die erhaltenen Ergebnisse streuen im Fall von Serienerprobungen für Begriffe der Betriebsfestigkeit im Normalfall sehr wenig, was sich dadurch begründen lässt, dass die Serienproduktion ihre Produktqualität für gewöhnlich sehr gut unter Kontrolle hat und Streuungen im Hinblick auf Materialeigenschaften und Geometrie sehr gering ausfallen.

Der Prüfaufbau dynamischer Komponentenerprobungen ähnelt dem der statischen Erprobungen. Unter dynamischer Erprobung wird hier die zyklische Belastung durch wechselseitiges Aufbringen von Drehmoment auf eine Komponente verstanden. Da schlussendliches Ziel eine Wöhlerlinie des Bauteils sein soll, wird die Belastung mit konstanter Mittelspannung und Amplitude aufgebracht. Ausgehend von der Mittelspannung, die üblicherweise bei Erprobungen bei MPT Lannach zu Null gesetzt wird, wird die

Belastung sinusförmig über die Zeit aufgebracht. Eine bekannte und etablierte Kenngröße in diesem Zusammenhang ist das Spannungsverhältnis R , welches definiert ist als Verhältnis von unterer Spannung zu oberer Spannung, welche durch Aufbringen der Belastung erzeugt wird. Im praktisch angewandten Fall der dynamischen Erprobungen bei MPT Lannach wird aber das Verhältnis des unteren aufgetragenen Drehmoments (=Mittelbelastung - Amplitude) und oberen Drehmoments (=Mittelbelastung + Amplitude) verstanden. [20]

Die Definitionen lauten also:

$$R = \frac{\sigma_u}{\sigma_o}$$

bzw. für die praktische Anwendung im Bereich der Betriebsfestigkeitserprobung bei MPT Lannach

$$R = \frac{M_u}{M_o}$$

mit

R ... Spannungsverhältnis

σ_u ... untere Spannungsamplitude in $\frac{N}{mm^2}$

σ_o ... obere Spannungsamplitude in $\frac{N}{mm^2}$

M_u ... untere Drehmoment- Belastungsamplitude in Nm

M_o ... obere Drehmoment- Belastungsamplitude in Nm

Das Drehmoment wird üblicherweise über Hydraulikzylinder zur Verfügung gestellt, da sich hier eine neue Anforderung, die einer höheren gewünschten Frequenz der aufzubringenden Schwingspiele, ergibt. Dabei muss eine starke Erwärmung des Bauteils vermieden werden, wodurch relevante Einflüsse auf die Materialeigenschaften entstehen könnten. Dynamisch werden üblicherweise insgesamt mindestens 9 Prüflinge erprobt, wobei beispielsweise auf drei verschiedenen Lastniveaus, also drei verschiedenen hohen Amplituden bei aber immer der gleichen Mittelspannung, jeweils drei Prüflinge bis zum Versagen erprobt werden. Das Versagen wird definiert durch Überschreiten eines vordefinierten Winkels beim Aufbringen der jeweiligen Belastungsamplitude, was im Normalfall einem technischen Anriss zuzuschreiben ist und zur automatischen Abschaltung der Erprobung führt. Zur Sicherstellung, dass ein Anriss vorliegt, wird nach automatischer Abschaltung des Prüfstands bei der Überschreitung des vorgegebenen Winkels eine Sichtprüfung durch den Prüfstandsverantwortlichen durchgeführt.

Die Punkte, welche somit durch die Anzahl der Lastwechsel bis Ermüdung und die Momentenamplitude definiert sind, werden in ein doppellogarithmisches Diagramm eingetragen (Abszisse: Anzahl an Lastwechseln bis Versagen, Ordinate: Belastungsamplitude, im Fall aller in dieser Arbeit betrachteten

5. Der Ablauf von Bauteilerprobungen

Erprobungen angegeben in Nm). Zur Generierung einer Wöhlerlinie aus diesen Punkten gibt es verschiedenste Ansätze, welche alle zu mehr oder weniger verschiedenen schlussendlich resultierenden Auswertungen führen. Eine sehr eindrucksvolle Gegenüberstellung dieser wurde in einer Studie von Finnley und Mann [22] realisiert. Müller [9] hat sich in seiner Dissertation „Zur statistischen Auswertung experimenteller Wöhlerlinien“ sehr ausführlich mit diesem Thema beschäftigt. Der in der hier vorliegenden Arbeit zur Wöhlerlinienermittlung durchgeführte Ansatz beruht auf der Regression der Punkte im Lastwechsel bis Bruch / Belastungsamplitude- Diagramm. Diesen Punkten wird somit Normalverteilung unterstellt. Resultat dieses Verfahrens ist schlussendlich eine B50 Wöhlerlinie, also eine Wöhlerlinie, die 50% Überlebenswahrscheinlichkeit des betreffenden Bauteils, genauer gesagt der betreffenden Kerbe, repräsentieren soll. [11]

Zur Abbildung sollte beachtet werden, dass in vielen Darstellungen von Wöhlerlinien üblicherweise zwischen $1e3$ bis $1e4$ Lastwechseln ein Abknicken in den Kurzzeitfestigkeitsbereich angenommen wird (im Diagramm von rechts kommend gesehen, also von hoher Lastwechselzahl zu niedriger Lastwechselzahl). Die Wöhlerlinie würde in diesem Fall dann von $1e0$ bis $1e4$ idealisiert horizontal verlaufen (genannt Kurzzeitfestigkeitsbereich).

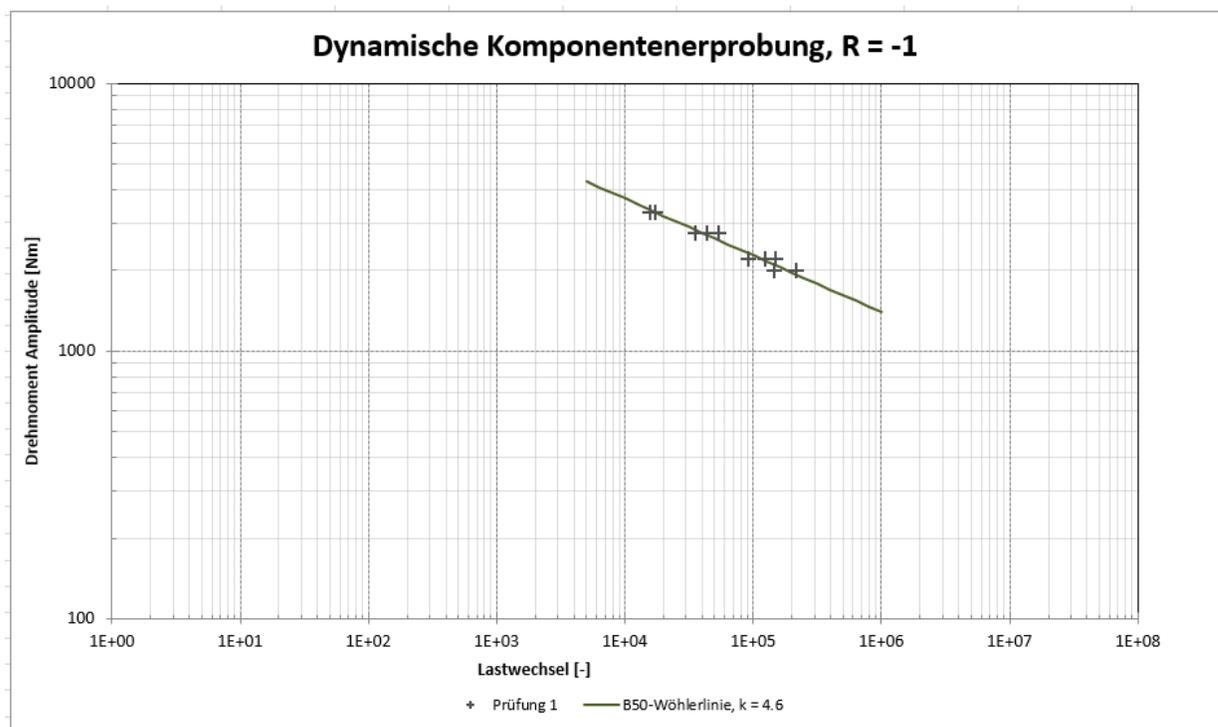


Abbildung 8: Versuchsergebnisse und Wöhlerlinie

6. Werkstofftechnische Analysen

Werkstofftechnische Analysen erprobter Prüflinge werden aus mehreren Gründen mit jeweils dafür ausgerichteten Analysemethoden durchgeführt. Grundsätzlich wird zwischen zerstörungsfreien und zerstörenden Methoden unterschieden, wobei bei ersteren die Prüflinge einsatzfähig und in einem Stück bleiben, etwa bei optischen Prüfungen auf Risse, bei letztgenannten hingegen für die Erstellung von Schliffen zerstört werden müssen und danach nicht mehr in Einsatz genommen werden können. Zumeist erste Fragestellung nach erfolgter Erprobungen ist die genaue Bruchstelle bzw. der Ort des Anrisses. Hierfür kommen Sichtprüfungen, Magnetpulverprüfung und Farbeindringprüfung zum Einsatz.

Sichtprüfung: Diese erfolgt üblicherweise direkt im Anschluss an die Erprobung. Gemeint ist die optische Überprüfung entweder mit freiem Auge oder unter optischen Vergrößerungen wie einer Lupe oder Kameras. Ziel hiervon soll die grobe Lokalisierung der Anrissse sein. Oft kann die für den Ausfall verantwortliche Kerbstelle hier bereits nahezu eindeutig festgestellt werden. Noch eindeutiger ist das bei den meisten quasistatischen Erprobungen, bei denen meistens ein kompletter Bruch über den gesamten Querschnitt erfolgt.



Abbildung 9: Eindeutige Zuordnung einer Kerbe zum Bruch, hier ein umlaufender Einstich zwischen zwei Steckverzahnungen

Magnetpulverprüfung: Diese Methode wird vor allem nach dynamischen Erprobungen eingesetzt, in denen kein kompletter Bruch über den gesamten Querschnitt erfolgte, sondern nur technische Anrisse in einer Größenordnung von Millimetern oder zehntel Millimetern erfolgten und damit ein Ausfall definiert wurde. Dabei wird das Bauteil an der zu untersuchenden Stelle magnetisiert und Eisenspäne an der Oberfläche aufgebracht. Zusätzlich werden fluoreszierende Zusätze beigemischt. Durch eine Beeinflussung der Magnetfeldlinien durch Risse an der Oberfläche häufen sich die Partikel an Stellen von Anrissen,

welche im Dunkeln schlussendlich deutlich erkennbar werden. Die Magnetisierung sollte auf jeden Fall in mehreren Richtungen erfolgen (wenn möglich im 90° Winkel zueinander), um die Magnetfeldlinien dementsprechend auszurichten und Risse in allen Richtungen eindeutig auszumachen. Dadurch kommen auch jene Risse zur Geltung, die parallel zu den Magnetfeldlinien der ersten Prüfung verlaufen und dort nicht detektiert werden konnten.

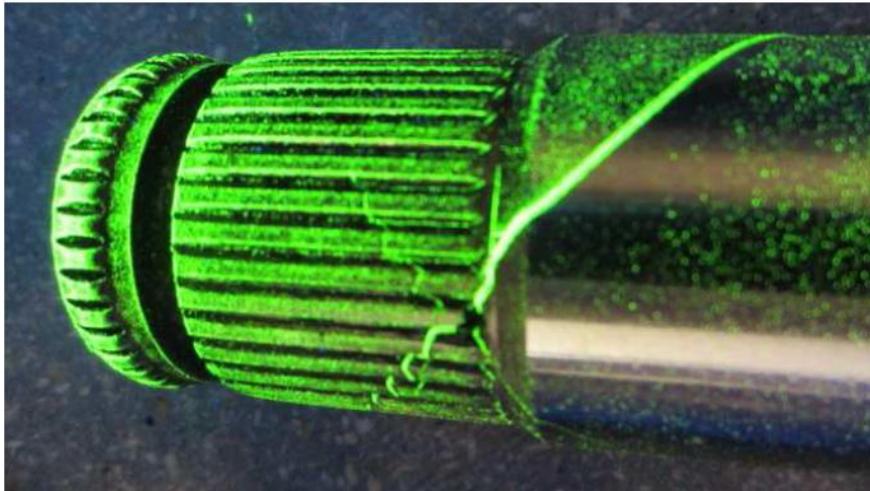


Abbildung 10: Beispiel des Ergebnisses einer Magnetpulverprüfung mit fluoreszierenden Zusätzen

Farbeindringprüfung: Auch die Farbeindringprüfung dient der Identifizierung und dem Sichtbarmachen von Rissen an der Oberfläche. Hierbei wird das Bauteil, nachdem es von Rückständen gereinigt wurde, mit einem Eindringmittel benetzt, welches durch die Kapillarwirkung in Risse an der Oberfläche dringt. Nach dem wiederholten Auftragen mit Eindringmittel und kurzer Wartezeit wird der Prüfling grob trocken gereinigt, um überschüssiges Eindringmittel zu beseitigen. In weiterer Folge wird ein sogenannter Entwickler, meist pulvriges Material, aufgetragen, welcher einen hohen Farbkontrast zum Eindringmittel aufweist und dieses wieder aus den Rissen aufsaugt. Schlussendlich sind somit auch hier Risse an der Oberfläche in der Regel sehr deutlich erkennbar gemacht worden. [14] [19]

Zur Analyse der Festigkeitskennwerte erprobter Bauteile kommen üblicherweise Härtemessungen zum Einsatz. Die Untersuchungen sind meist von Interesse, um festzustellen, ob produzierte Bauteile den geforderten Spezifikationen bezüglich Materialeigenschaften entsprechen. Die gängigsten und in der Werkstoffanalyse bei MPT Lannach eingesetzten Verfahren bilden die Härteprüfung nach Rockwell, die Härteprüfung nach Vickers und in Einzelfällen, bei weichem Kernmaterial, die Härteprüfung nach Brinell. Grundsätzliche Vorgehensweise ist bei allen drei Verfahren, dass ein zum Bauteil bzw. Schliff verhältnismäßig sehr harter (etwa bei Messung nach HRC aus Diamant bestehender), kleiner Prüfkörper mit einer vorgegebenen Prüfkraft für eine definierte Zeit, je nach Methode nach Einhaltung einer

definierten Vorbelastung und dann der Prüfbelastung, gedrückt wird. Nach anschließender Entlastung wird aufgrund des hinterlassenen Abdrucks auf die Härte des zu prüfenden Materials geschlossen. Bei Härteprüfung nach Rockwell, HRC, wird der Prüfkörper durch einen kegelförmigen Diamant gebildet. Bei Härteprüfung nach Brinell, HRB, ist der Prüfkörper eine Kugel aus Hartmetall. Der Prüfkörper nach Vickers, HV, ähnelt dem nach Rockwell. Es handelt sich um einen pyramidenförmigen Diamant.

Da Oberflächen zur Härteprüfung nach Norm geforderte Kriterien erfüllen müssen (etwa bezüglich der Oberflächenkrümmung), werden üblicherweise Axial- oder Radialschliffe an Getriebewellen erstellt, diese in Schliffbetten eingebettet und anschließend normgerecht geprüft. Hiermit geht also die Zerstörung des Prüflings einher. [17] [18] [19]

7. Beschreibung der Durchführung von Versuchsnachrechnungen allgemein

KISSsoft

Der Modellaufbau in KISSsoft konnte stark vereinfacht erfolgen, da alle nachgerechneten Erprobungen rein auf Torsion erprobt wurden. Es konnte somit einzig die Bruchstelle mit der zugehörigen Kerbe modelliert werden und der Rest unberücksichtigt bleiben, was zulässig ist, solange keine Biegebelastung vorliegt, die mitberücksichtigt werden müsste.

Die in der jeweiligen Erprobung gebrochene Kerbstelle wurde in KISSsoft mithilfe der Bauelemente „Zylinder“ bzw. „Konus“ nachgebildet. War am betroffenen Querschnitt eine Innenbohrung vorhanden, wurde diese mithilfe der Elemente „zylindrische Bohrung“ oder „konische Bohrung“ nachgebildet, worauf darauf geachtet wurde, dass der Innenbohrungsdurchmesser an der Auswertestelle bei Verwendung des Elements „konische Bohrung“ mit jener bei den realen Prüflingen gemessenen Innenbohrungsdurchmesser übereinstimmt. Für die Aufbringung der Torsionsbelastung wurde das Feature „Kupplung“ verwendet, auf der anderen Seite wurde mittels „Support → Einspannung“ fix eingespannt und alle Verdrehungen und Verschiebungen am anderen Ende gesperrt. Als Belastung wurde für die Nachrechnung quasistatischer Erprobungen die in der Erprobung ermittelte maximal ertragene Belastung vor dem Versagen des Bauteils angesetzt. Für die Nachrechnung dynamischer Erprobungen wurde jene Lastamplitude verwendet, welche die durch die Erprobungen ermittelte Wöhlerlinie bei $1e6$ Lastwechseln aufwies. Mit diesen wurde ein Dauerfestigkeitsnachweis geführt, um eine künstlich generierte Abweichung der Berechnungsmethodik durch Zurückrechnen auf einer Wöhlerlinie mit einer vom Versuch abweichenden Wöhlerliniensteigung zu vermeiden (was durch einen Zeitfestigkeitsnachweis mit den von der FKM Richtlinie vorgeschlagenen und in KISSsoft übernommenen Wöhlerliniensteigungen passiert wäre, da die im Versuch ermittelten Wöhlerliniensteigungen oft stark von den pauschal empfohlenen abweichen. In allen betrachteten Fällen im Sinne eines zu konservativen Rechenergebnisses, da die ermittelten Wöhlerliniensteigungen immer steiler waren, $k=4...17$, als die vorgeschlagene, $k=25$ für randschichtverfestigter Bauteile unter Torsionsbelastung). [1]

Als Werkstoff- Festigkeitskennwerte wurden die Mittelwerte der Messergebnisse eingelesen, die durch die Analysen im werkstofftechnischen Labor ermittelt wurden. Die gemessenen Werte der Härte wurden in Anlehnung an die derzeit gültige Norm (DIN EN ISO 18265:2014 [2]) in Zugfestigkeit umgewertet. Sollte in Extremfällen eine so hohe Härte an der Oberfläche ermittelt worden sein, dass keine Tabellenwerte nach Norm mehr zur Verfügung stehen würden, wurden die Tabellenwerte, sofern noch sinnvoll, extrapoliert und mit den Werten der durch die in der FKM Richtlinie vorgeschlagene Umrechnungsformel (Glg. 5.5.25, $R_{m,RS} = 3,3 * HV_{Rand}$) [1] verglichen. Die durch diese Formel ermittelten Zugfestigkeiten wären in den relevanten Fällen immer niedriger als die durch die Tabelle erhaltenen. Als Konvention für die Nachrechnungen wurde daher definiert, die durch die Tabelle in der Norm erhaltenen Kennwerte zu

verwenden. Die für die Nachrechnungen höchste relevante Abweichung durch Verwendung der anderen Methode zur Härteumrechnung würde 4% (bezogen auf die umgewertete Zugfestigkeit) betragen.

Zur Ermittlung der Wechselfestigkeiten wurde in KISSsoft die Einstellung „R_p, R_m aus Datenbank, σ_w ermittelt aus R_m“ verwendet. Die erforderlichen Sicherheiten wurden auf 1 gesetzt. Wie nach Berechnungsrichtlinie oberflächenverfestigter Bauteile in KISSsoft bei MPT Lannach definiert, wird die Kernhärte bei einsatzgehärtet vorliegender Oberfläche beim statischen Festigkeitsnachweis um den Faktor 1,3 aufgewertet, bei induktionsgehärtet vorliegender Oberfläche um den Faktor 1,4.

Verwendet wurde KISSsoft Version 03- 2017 I.

Für die Auswertungen in dieser Arbeit sind schlussendlich die von KISSsoft errechneten Sicherheiten gegen Bruch unter statischer Belastung (im KISSsoft- Protokoll „SB“ genannt) und die errechneten Sicherheiten gegen Ermüdungsbruch (im KISSsoft- Protokoll „SD“ genannt) relevant.

FEMFAT

Für die Nachrechnungen wurde vom FEMFAT Basic Modul Gebrauch gemacht. Im Speziellen wurde die FEMFAT Break- Rechnung für die Nachrechnung statischer Erprobungen bis Bruch sowie die Endurance- Rechnung („Safety Factor due to Cycle Limit“) für die Nachrechnungen von Ermüdungsbrüchen verwendet.

Das Einlesen der Spannungen erfolgte im Reiter „Stress Data“ durch die Methode „Upper / Lower“. Im Fall statischer Erprobungen reicht ein FE- Ergebnisfile, welches zum Einlesen der „Upper“- Spannungen verwendet wird.

Im Falle dynamischer Erprobungen werden zwei FE- Ergebnisfiles eingelesen: Erstens jenes, bei dem der Prüfling mit der Belastungsamplitude in die eine Momentenrichtung belastet wird („upper“), im „lower“- Feld jenes, bei dem der Prüfling in derselben Belastungshöhe in die andere Richtung belastet wird. [21]

Als Materialwerte wurden die tatsächlich im Werkstofflabor gemessenen Härtewerte, nach derzeit gültiger Norm (DIN EN ISO 18265:2014 [2]) in Festigkeit umgewertet, übergeben. Falls notwendig und sich in einem noch sinnvollen Bereich befindlich, wurde ebenfalls nach gleicher Konvention wie in KISSsoft vorgegangen, zu extrapolieren und nicht nach Vorschlag in der FKM Richtlinie vorzugehen. In FEMFAT wurde eingestellt, dass es sich dabei um Werkstoffkennwerte für eine Überlebenswahrscheinlichkeit von 50% handelt (Material Data – Type dependent S-N data – survival probability). Die harte Randschicht, die durch die in den meisten Fällen vorhandene Randschichthärtung vorhanden ist, wurde dabei folgendermaßen berücksichtigt: Durch einen in Microsoft Excel realisierten Sortieralgorithmus wurden die Abaqus Solver- Inputs eingelesen und von diesem die Knoten und Elemente, sortiert in 4 Schichten, ausgegeben. Dabei wurde die Randschicht, definiert durch den Bereich von der Oberfläche bis zur in der Werkstofftechnik gemessenen Einhärtetiefe in drei jeweils gleich große Schichten unterteilt. Der obersten davon wurde in den späteren Nachrechnungen bei der FEMFAT Auswertung die Oberflächenhärte zugeordnet, der zweiten der Mittelwert zwischen Oberflächenfestigkeit und Festigkeit bzw. Härte an der

7. Beschreibung der Durchführung von Versuchsnachrechnungen allgemein

Stützstelle, die für die Ermittlung der Einhärtetiefe verwendet wurde (zu Beispiel CHD 660HV1). Der dritten Schicht wurde in der späteren Analyse die Härte (umgewertet in Zugfestigkeit) der Stützstelle zugeordnet. Allen darunter liegenden Elementen wurde die Kernfestigkeit zugeordnet. Sollte der FEMFAT Material Generator für die zugewiesenen Werkstoffe eine Bruchdehnung kleiner 1% vorgeschlagen haben, wurde diese Bruchdehnung stattdessen manuell auf 1% rechnerischen Wert korrigiert.

Ausgewertet wurde gegen eine Überlebenswahrscheinlichkeit von 50%, um mit dem Versuch konsistente bzw. vergleichbare Ergebnisse zu erhalten.

Werkstoffkennwerte

Die werkstofftechnischen Analysen, die im Anschluss an die Erprobungen durchgeführt wurden, wurden zum allergrößten Teil im werkstofftechnischen Labor des Unternehmensstandorts bereits im Zuge der Verifikationsprozesse durchgeführt. Blieben noch Fragen offen bzw. mussten Härtewerte genauer an bestimmten Punkten ermittelt werden, wurden noch eigene Messungen hierfür durchgeführt. Nebenbei erwiesen sich die Schliffe, die für die werkstofftechnischen Analysen angefertigt wurden, als äußerst hilfreich für die Ermittlung von Kerbrundungsradien im Bruchbereich unter dem Mikroskop. Die Messungen wurden nach den Standards des Werkstofflabors am Standort durchgeführt, wobei diese die hierfür gültigen Normen berücksichtigen. Zum Einsatz kamen dabei die beschriebenen Verfahren nach Brinell, Rockwell und Vickers nach jeweils gültigen Normen. In den genaueren Daten zu den einzelnen Rechnungen findet sich die jeweilige Angabe über das verwendete Verfahren.

8. Über die Durchführung von Versuchsnachrechnungen bei rotationssymmetrischen Kerben unter statischer Belastung

In die Kategorie der geometrisch rotationssymmetrischen Kerben auf Antriebswellen fallen alle Arten von umlaufenden Einstichen, etwa für Sicherungsringe. Diese werden je nach Zweck rund oder rechteckförmig ausgeführt. Des Weiteren werden unter diesem Sammelbegriff alle Arten von Wellenabsätzen, entweder konisch in einem stumpfen Winkel verlaufend oder als Anschlag für Wälzlager mit senkrecht zueinander stehenden Flächen, mit und ohne Freistich ausgeführt, zusammengefasst. Gemeinsamkeit aller unter diesem Sammelbegriff stehenden geometrischen Formen ist, dass der Aufwand einer Festigkeitsberechnung mithilfe örtlicher Bewertung durch eine FE- Rechnung hier am geringsten ausfällt. Im Rahmen dieser Arbeit wurden für Kerben dieser Kategorie zwei Methoden angewendet und gegenübergestellt: Der Festigkeitsnachweis nach Nennspannungskonzept in Anlehnung an die FKM Richtlinie (Kapitel 1), realisiert in der Berechnungssoftware KISSsoft, sowie nach örtlichem Konzept mithilfe einer 2D FE- Berechnung in ABAQUS und anschließender Auswertung in FEMFAT.

Belastung in den Rechenmodellen bildete sowohl in der KISSsoft- als auch der FEMFAT- Rechnung das maximal im Versuch erreichte Drehmoment.

Für die Modellierung rotationssymmetrischer Kerben und rotationssymmetrischer Belastung wurden 2D-FE- Netze gewählt. Einen typischen Modellaufbau zeigt die untenstehende Abbildung.

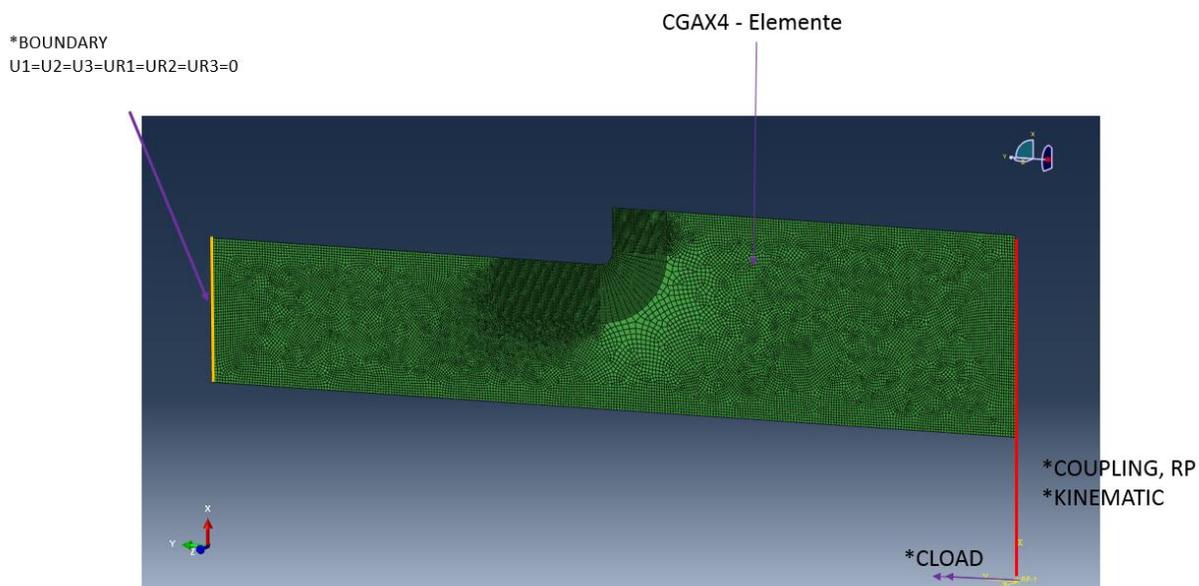


Abbildung 11: Modellaufbau FE 2D

8. Über die Durchführung von Versuchsnachrechnungen bei rotationssymmetrischen Kerben unter statischer Belastung

Für die Vernetzung wurden die axialsymmetrischen Elemente CGAX4 verwendet. Auf der einen Seite wurden die Knoten bzw. Elementflächen mithilfe einer kinematischen Kupplung auf einen Referenzpunkt gekoppelt (Abaqus Keyword *coupling *kinematic), auf den das Drehmoment mittels „concentrated force“ (Abaqus Keyword *cforce) aufgezwungen wurde. Auf der anderen Seite wurden die Knoten in allen Freiheitsgraden gesperrt (Abaqus Keyword *boundary, 1, 6, 0). Um bei zukünftigen Auslegungen Zeitersparnis zu haben, wurden Python- Skripte geschrieben, die 2D- FE- Modelle von gängigen Kerbformen an Wellen automatisiert erstellen.

Die Auswertung in FEMFAT erfolgte grundsätzlich wie in der allgemeinen Beschreibung angegeben ohne Abweichungen hiervon.

Für die hieraus folgenden errechneten Sicherheitswerte gegen Bruch unter statischer Belastung wurden der von KISSsoft errechnete Sicherheitsfaktor „SB“ und der niedrigste von FEMFAT im kritischen Bereich ermittelte Faktor „Stat_SF_A“ herangezogen. [21]

9. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei rotationssymmetrischen Kerben unter statischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge

Einsatzgehärtete Antriebswelle aus 17CrNiMo6-6, Bruchstelle Wellenabsatz

Datenbankeintrag Nummer 103

Material: 17CrNiMo6-6

Oberflächenbehandlung: Einsatzgehärtet

Anzahl an statisch erprobten Bauteilen: 3

Geometrische Kerbe an der Bruchstelle: Wellenabsatz

Nenndurchmesser: 24,7 mm

Bohrungsdurchmesser an Bruchstelle: 0 mm

Rundungsradius: 1,4 mm

Kernhärte Ist: 39,7 HRC

Tabelle zur Umwertung der Kernhärte in Festigkeit nach DIN 18265: A1

Zugfestigkeit im Kern, umgewertet aus Kernhärte: 1253 MPa

Oberflächenhärte Ist: 670 HV1

Zugfestigkeit der Oberfläche, umgewertet aus Oberflächenhärte in Anlehnung an DIN 18265: 2249 MPa

CHD 600 HV1: 1,18 mm

Durchschnittliches erreichtes Maximalmoment: 3595 Nm

Errechnete Sicherheit durch KISSsoft in Anlehnung an die FKM- Richtlinie mit der Kernhärte als Berechnungseingangswert: 0,68

Errechnete Sicherheit durch KISSsoft in Anlehnung an die FKM- Richtlinie mit der durch den Faktor 1,3 aufgewerteten Kernhärte als Berechnungseingangswert: 0,95

Errechnete Sicherheit durch FEMFAT, 2D FE- Modell: 0,89

9. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei rotationssymmetrischen Kerben unter statischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge

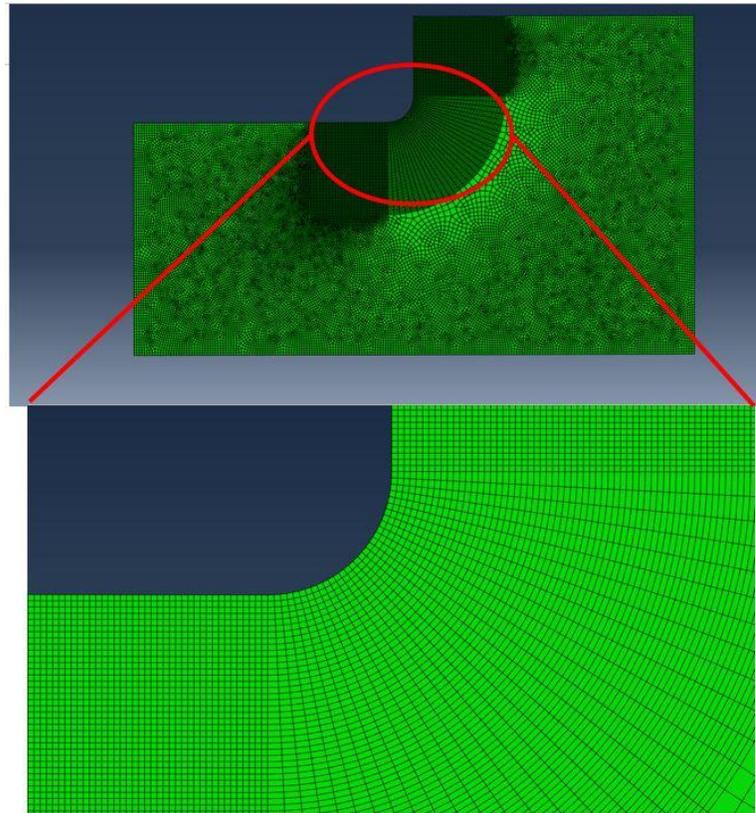


Abbildung 12: Modellaufbau zu Nr. 103

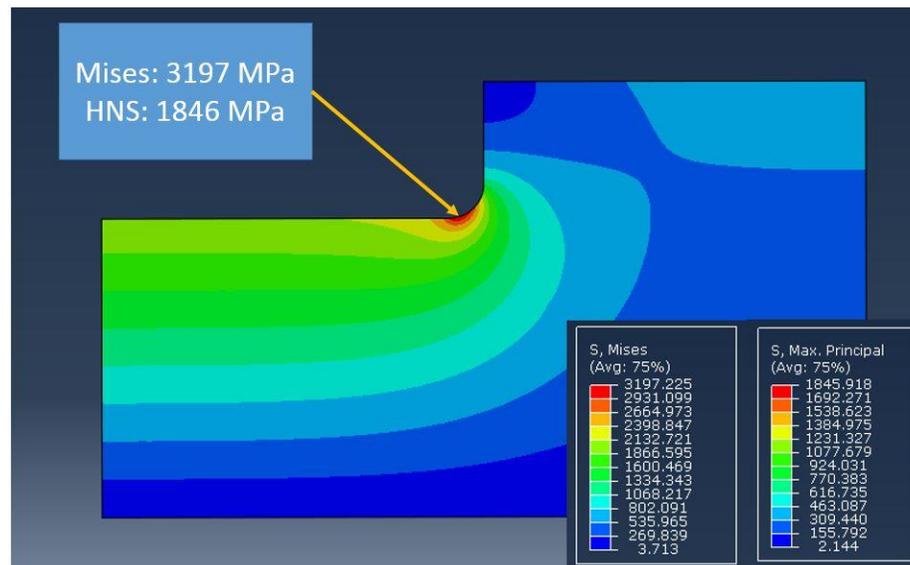


Abbildung 13: Spannungen zu Nr. 103

9. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei rotationssymmetrischen Kerben unter statischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge

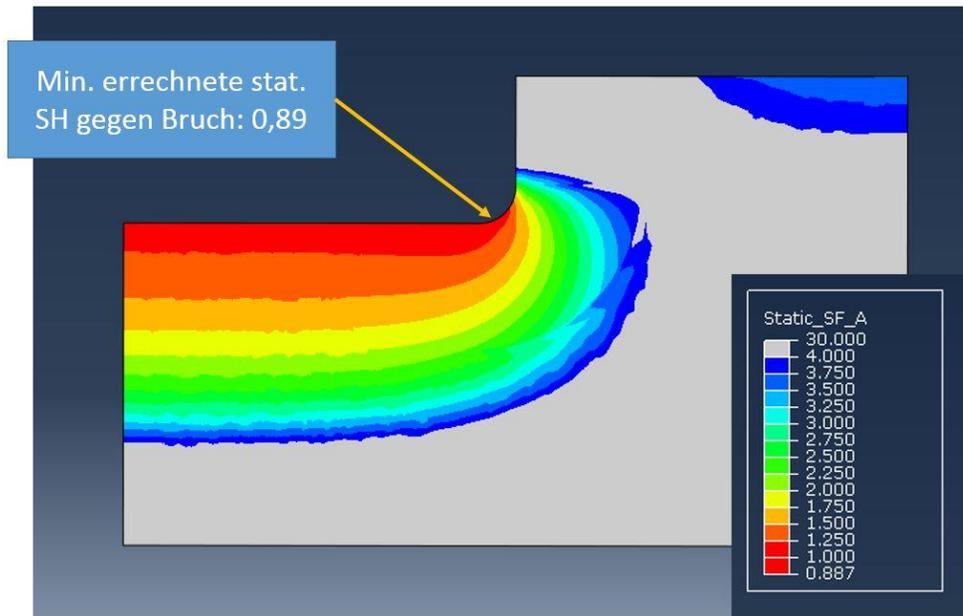


Abbildung 14: Errechnete Sicherheiten zu Nr. 103

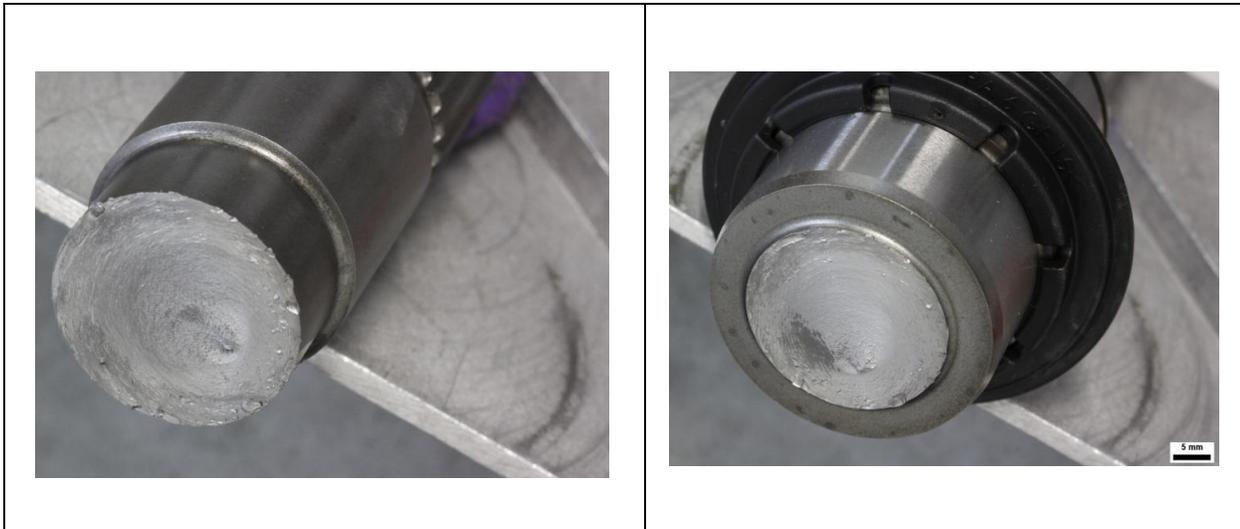


Abbildung 15: Bruchbilder zu Nr. 103

9. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei rotationssymmetrischen Kerben unter statischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge

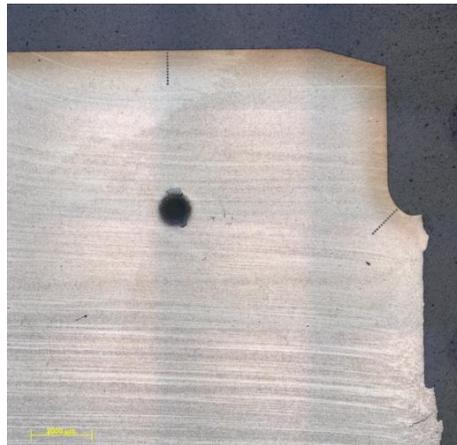


Abbildung 16: Schlibbild zu Nr. 103

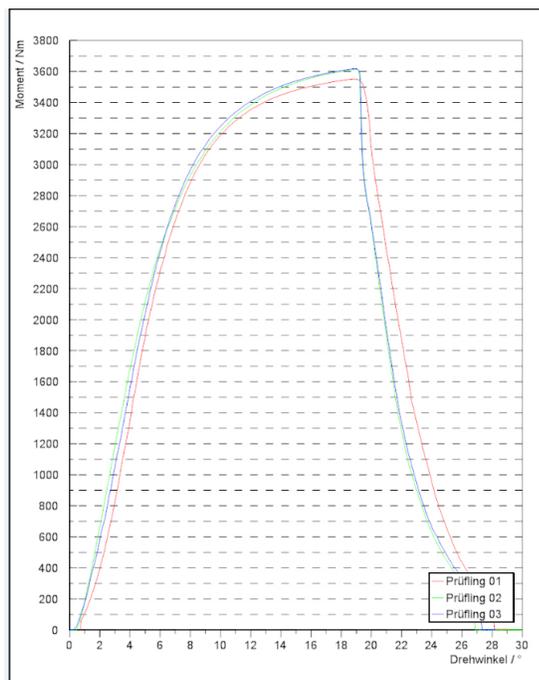


Abbildung 17: Moment / Verdrehwinkeldiagramm zu Nr. 103

Induktionsgehärtete Flanschelle aus C45, Bruchstelle Wellenabsatz
Datenbankeintrag Nummer 105

Material: C45E

Oberflächenbehandlung: Induktionsgehärtet

9. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei rotationssymmetrischen Kerben unter statischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge

Anzahl an statisch erprobten Bauteilen: 2

Geometrische Kerbe an der Bruchstelle: Wellenabsatz

Nenndurchmesser: 28 mm

Bohrungsdurchmesser an Bruchstelle: 0 mm

Rundungsradius: 0,8 mm

Kernhärte Ist: 233HV10

Tabelle zur Umwertung der Kernhärte in Festigkeit nach DIN 18265: B3

Zugfestigkeit im Kern, umgewertet aus Kernhärte: 774 MPa

Oberflächenhärte Ist: 58,0 HRC

Zugfestigkeit der Oberfläche, umgewertet aus Oberflächenhärte in Anlehnung an DIN 18265: 2195 MPa

EHT 480 HV1: 2,75 mm

Durchschnittliches erreichtes Maximalmoment: 5327,5 Nm

Errechnete Sicherheit durch KISSsoft in Anlehnung an die FKM- Richtlinie mit der Kernhärte als

Berechnungseingangswert: 0,44

Errechnete Sicherheit durch KISSsoft in Anlehnung an die FKM- Richtlinie mit der durch den Faktor 1,4 aufgewerteten Kernhärte als Berechnungseingangswert: 0,62

Errechnete Sicherheit durch FEMFAT, 2D FE- Modell: 0,78

9. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei rotationssymmetrischen Kerben unter statischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge

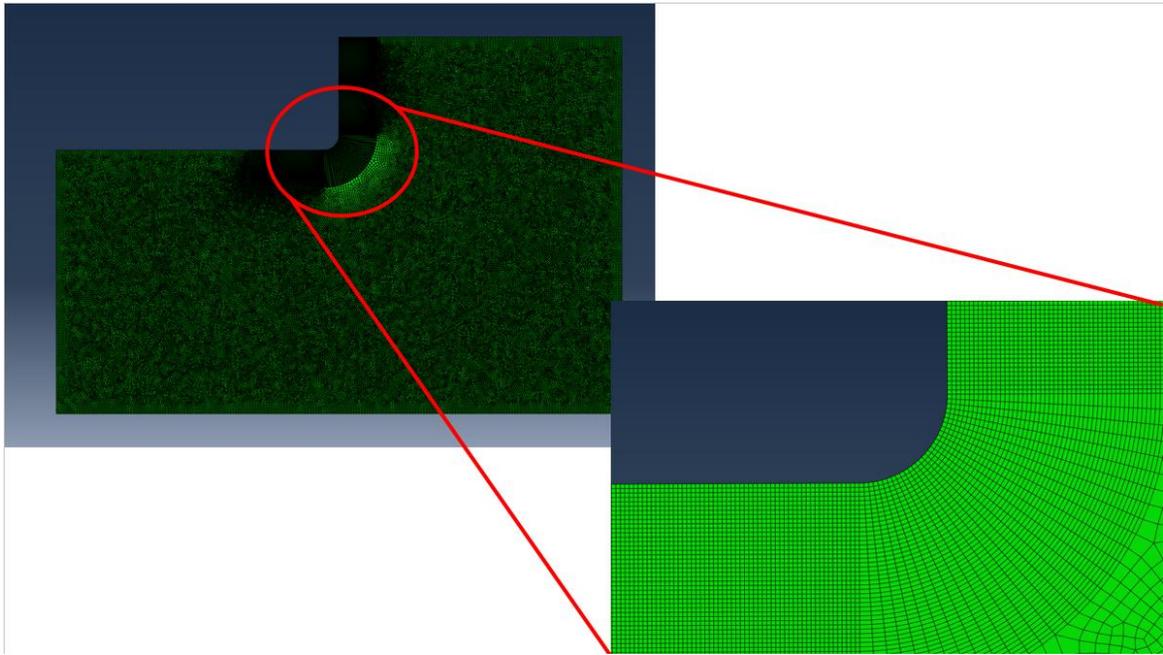


Abbildung 18: Modellaufbau zu Nr.105

9. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei rotationssymmetrischen Kerben unter statischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge

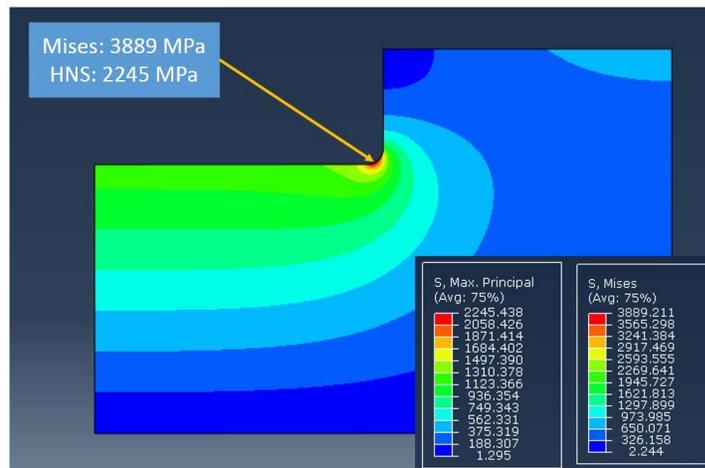


Abbildung 19: Spannungen zu Nr. 105

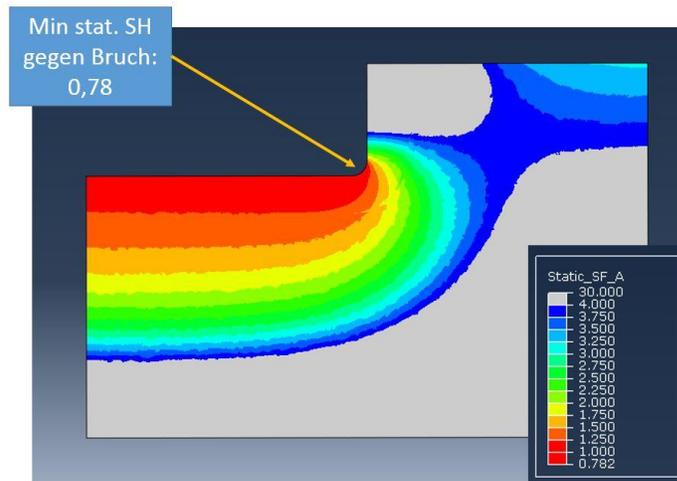


Abbildung 20: Errechnete Sicherheiten zu Nr. 105

Induktionsgehärtete Querwelle aus 42CrMo4, Bruchstelle Rechtecknut

Datenbankeintrag Nummer 106

Material: 42CrMo4

Oberflächenbehandlung: Induktionsgehärtet

Anzahl an statisch erprobten Bauteilen: 2

Geometrische Kerbe an der Bruchstelle: Rechtecknut

9. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei rotationssymmetrischen Kerben unter statischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge

Nenndurchmesser: 26,6 mm

Bohrungsdurchmesser an Bruchstelle: 10 mm

Rundungsradius: 0,2 mm

Kernhärte Ist: 329 HV10

Tabelle zur Umwertung der Kernhärte in Festigkeit nach DIN 18265: B2

Zugfestigkeit im Kern, umgewertet aus Kernhärte: 1032 MPa

Oberflächenhärte Ist: 667 HV1

Zugfestigkeit der Oberfläche, umgewertet aus Oberflächenhärte in Anlehnung an DIN 18265: 2237 MPa

EHT 450 HV1: 0,5 mm

Durchschnittliches erreichtes Maximalmoment: 3368 Nm

Errechnete Sicherheit durch KISSsoft in Anlehnung an die FKM- Richtlinie mit der Kernhärte als Berechnungseingangswert: 0,75

Errechnete Sicherheit durch KISSsoft in Anlehnung an die FKM- Richtlinie mit der durch den Faktor 1,4 aufgewerteten Kernhärte als Berechnungseingangswert: 1,05

Errechnete Sicherheit durch FEMFAT, 2D FE- Modell: 0,94

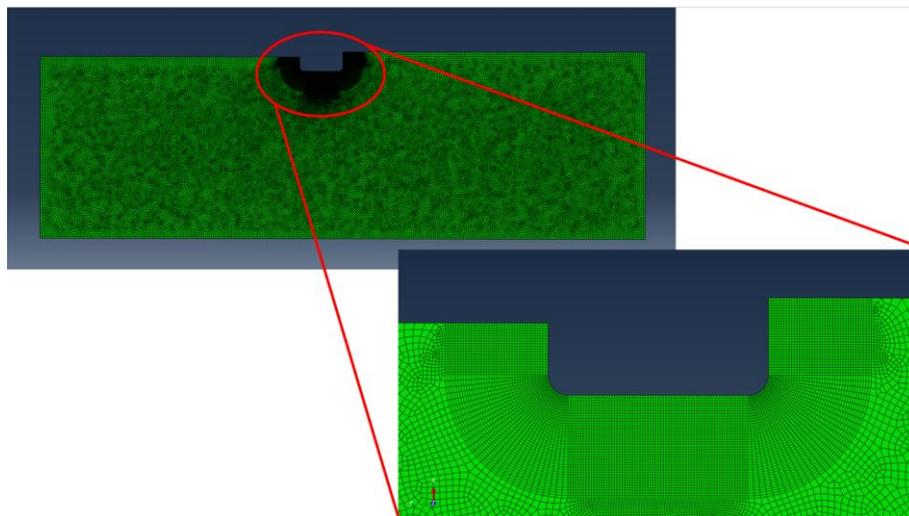


Abbildung 21: Modellaufbau zu Nr.106

9. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei rotationssymmetrischen Kerben unter statischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge

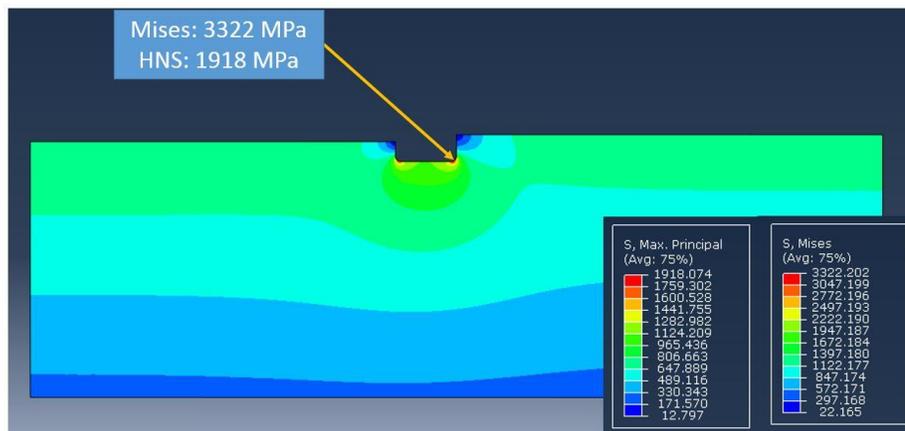


Abbildung 22: Spannungen zu Nr. 106

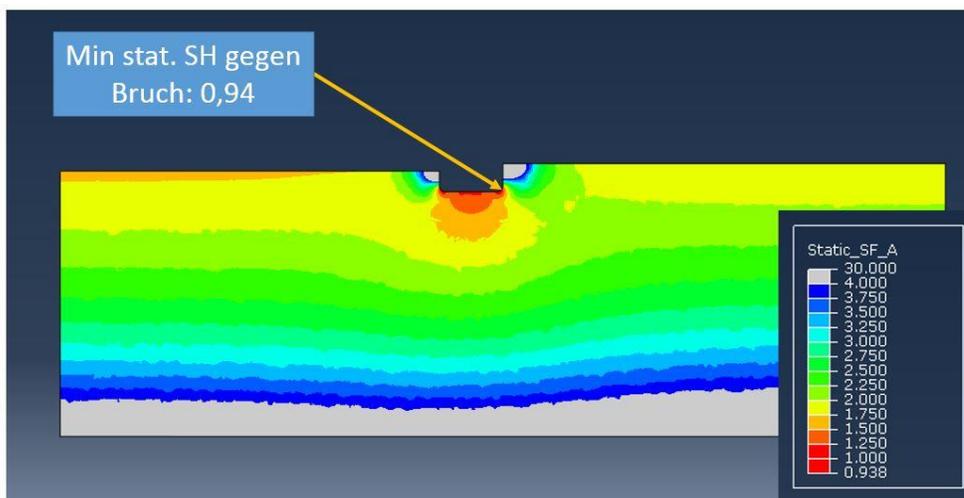


Abbildung 23: Errechnete Sicherheiten zu Nr. 106

9. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei rotationssymmetrischen Kerben unter statischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge

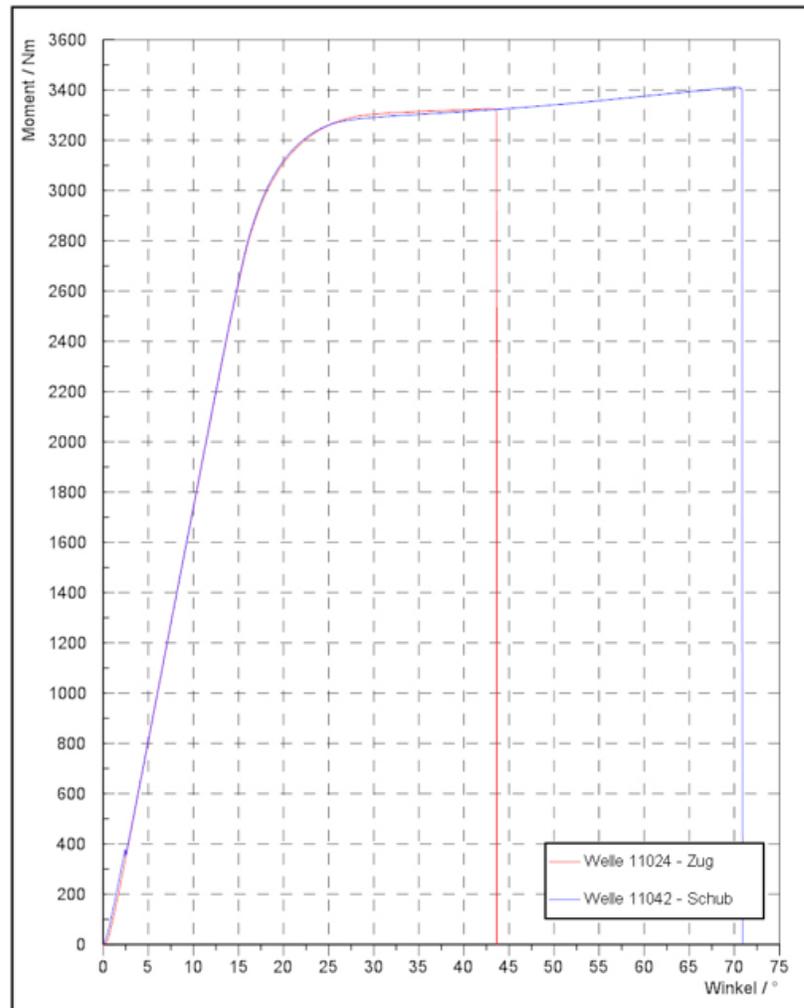


Abbildung 24: Moment / Verdrehwinkeldiagramm zu Nr. 106

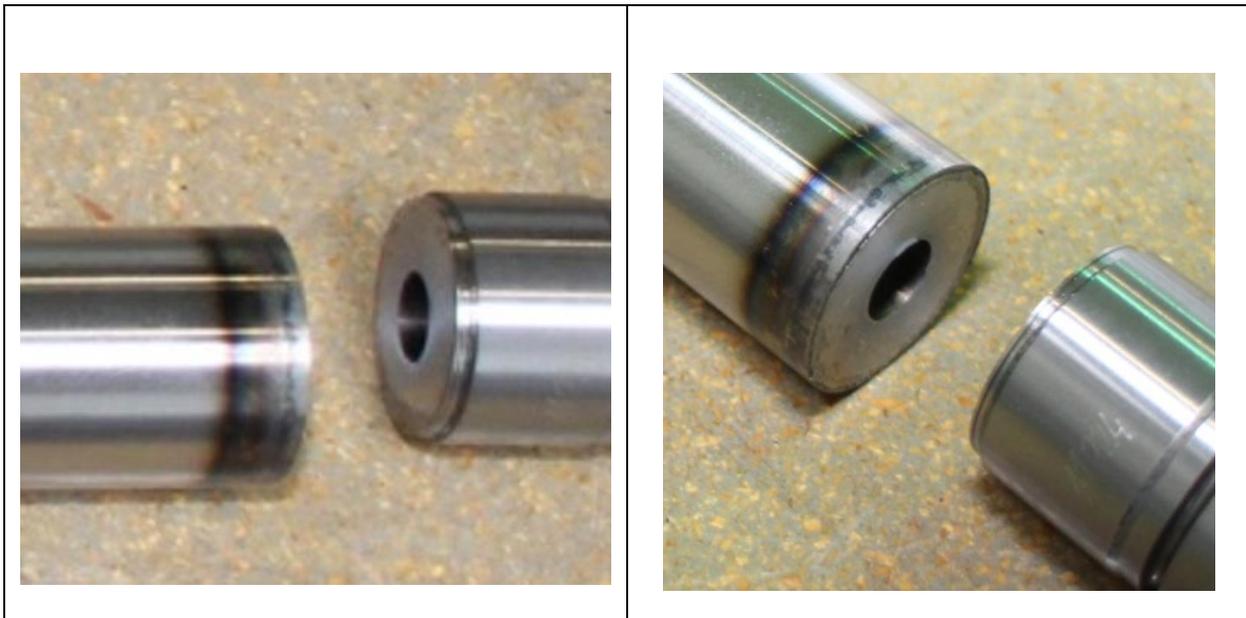


Abbildung 25: Bruchbilder zu Nr. 106

Einsatzgehärtete Antriebswelle aus 28MnCrB5-2, Bruchstelle Wellenabsatz

Datenbankeintrag Nummer 113

Material: 28MnCrB5-2

Oberflächenbehandlung: Einsatzgehärtet

Anzahl an statisch erprobten Bauteilen: 3

Geometrische Kerbe an der Bruchstelle: Wellenabsatz

Nenn Durchmesser: 24,7 mm

Bohrungsdurchmesser an Bruchstelle: 0 mm

Rundungsradius: 1,4 mm

Kernhärte Ist: 45,2 HRC

Tabelle zur Umwertung der Kernhärte in Festigkeit nach DIN 18265: A1

Zugfestigkeit im Kern, umgewertet aus Kernhärte: 1451 MPa

Oberflächenhärte Ist: 61,8 HRC

9. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei rotationssymmetrischen Kerben unter statischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge

Zugfestigkeit der Oberfläche, umgewertet aus Oberflächenhärte in Anlehnung an DIN 18265: 2498 MPa

CHD 620 HV1: 0,78 mm

Durchschnittliches erreichtes Maximalmoment: 3760 Nm

Errechnete Sicherheit durch KISSsoft in Anlehnung an die FKM- Richtlinie mit der Kernhärte als Berechnungseingangswert: 0,66

Errechnete Sicherheit durch KISSsoft in Anlehnung an die FKM- Richtlinie mit der durch den Faktor 1,3 aufgewerteten Kernhärte als Berechnungseingangswert: 0,86

Errechnete Sicherheit durch FEMFAT, 2D FE- Modell: 1,03

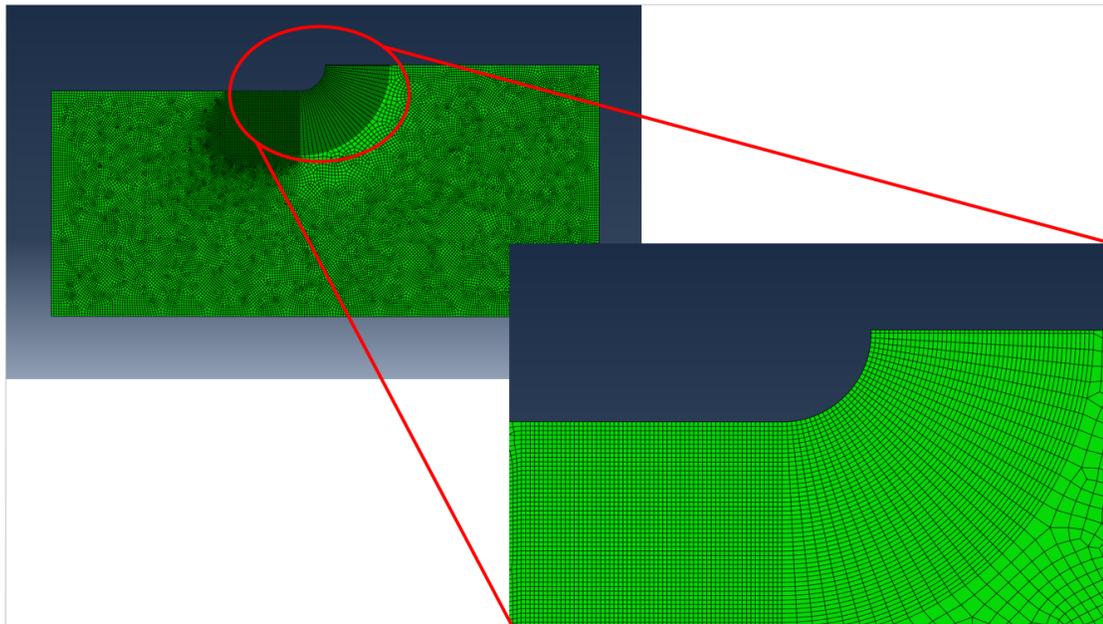


Abbildung 26: Modellaufbau Nr. 113

9. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei rotationssymmetrischen Kerben unter statischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge

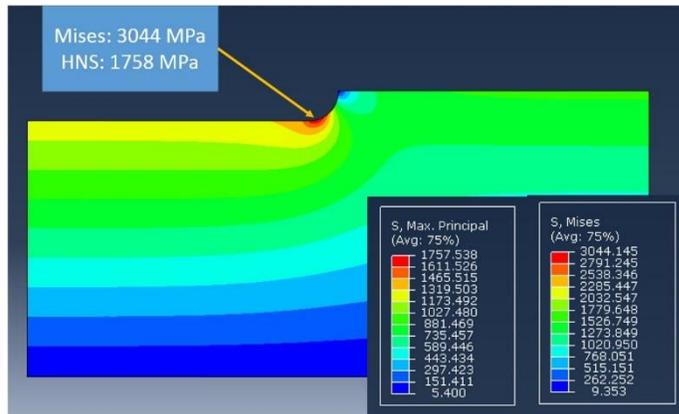


Abbildung 27: Spannungen Nr. 113

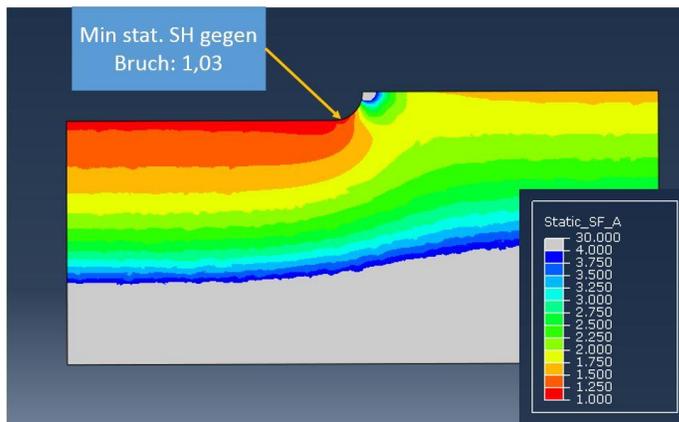


Abbildung 28: Errechnete Sicherheiten Nr. 113



Abbildung 29: Bruchbilder zu Nr. 113

9. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei rotationssymmetrischen Kerben unter statischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge

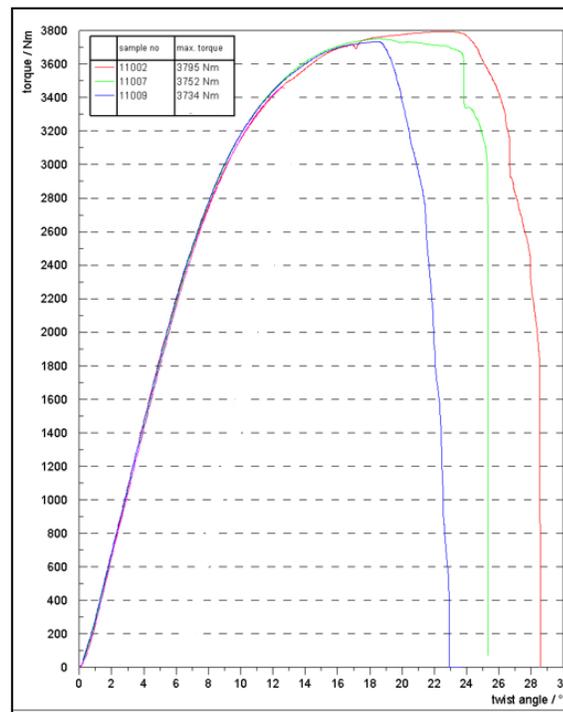


Abbildung 30: Moment / Verdrehwinkeldiagramm zu Nr. 113

Einsatzgehärtete Antriebswelle aus 28MnCrB7-2, Bruchstelle Wellenabsatz

Datenbankeintrag Nummer 124

Material: 28MnCrB7-2

Oberflächenbehandlung: Einsatzgehärtet

Anzahl an statisch erprobten Bauteilen: 5

Geometrische Kerbe an der Bruchstelle: Wellenabsatz

Nenndurchmesser: 24,7 mm

Bohrungsdurchmesser an Bruchstelle: 0 mm

Rundungsradius: 2,7 mm

Kernhärte Ist: 38,15 HRC

Tabelle zur Umwertung der Kernhärte in Festigkeit nach DIN 18265: A1

Zugfestigkeit im Kern, umgewertet aus Kernhärte: 1202 MPa

9. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei rotationssymmetrischen Kerben unter statischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge

Oberflächenhärte Ist: 57,7 HRC und 682,5 HV

Zugfestigkeit der Oberfläche, umgewertet aus Oberflächenhärte in Anlehnung an DIN 18265: 2236 MPa

CHD 620 HV1: 0,79 mm

Durchschnittliches erreichtes Maximalmoment: 3591 Nm

Errechnete Sicherheit durch KISSsoft in Anlehnung an die FKM- Richtlinie mit der Kernhärte als Berechnungseingangswert: 0,63

Errechnete Sicherheit durch KISSsoft in Anlehnung an die FKM- Richtlinie mit der durch den Faktor 1,3 aufgewerteten Kernhärte als Berechnungseingangswert: 0,82

Errechnete Sicherheit durch FEMFAT, 2D FE- Modell: 0,93

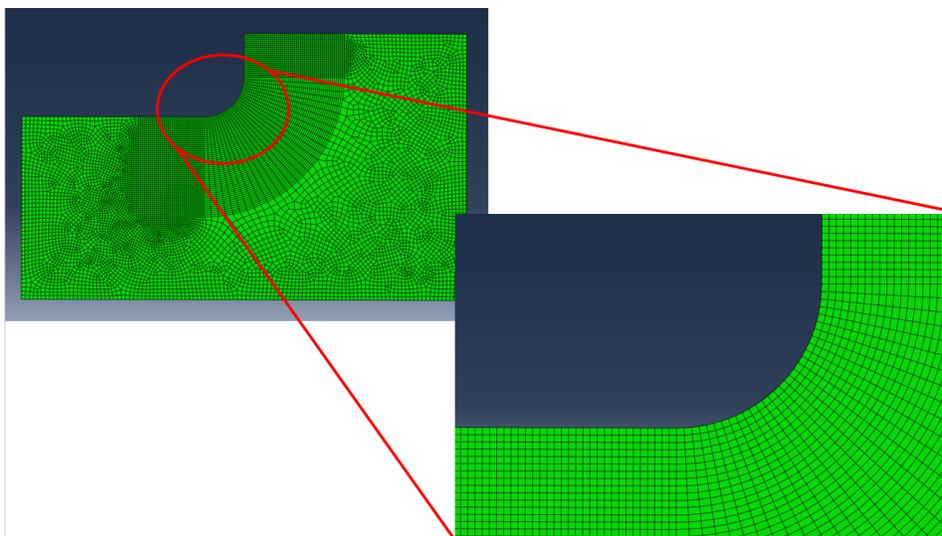


Abbildung 31: Modellaufbau Nr. 124

9. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei rotationssymmetrischen Kerben unter statischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge

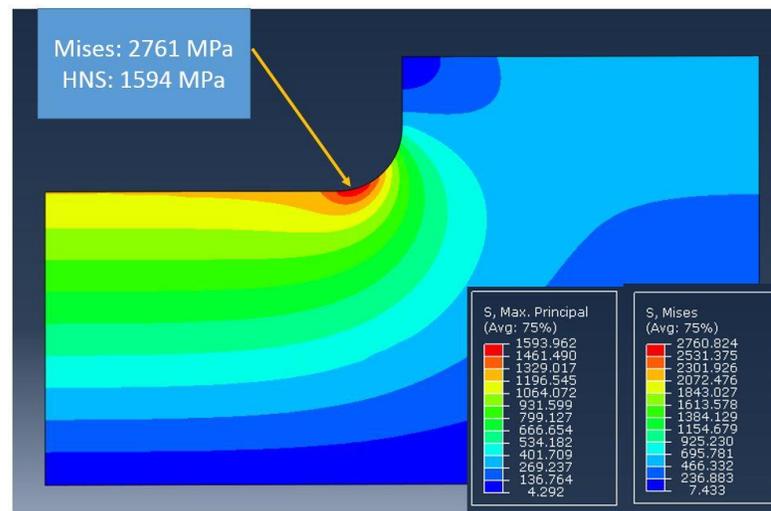


Abbildung 32: Spannungen Nr. 124

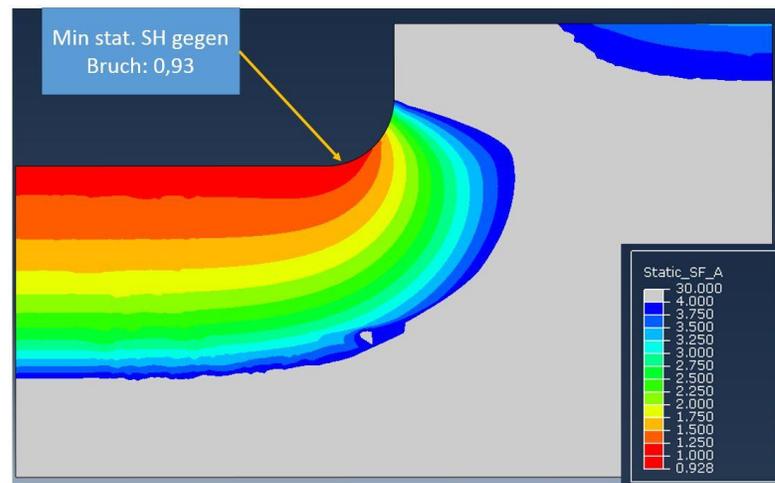


Abbildung 33: Errechnete Sicherheiten Nr. 124

9. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei rotationssymmetrischen Kerben unter statischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge

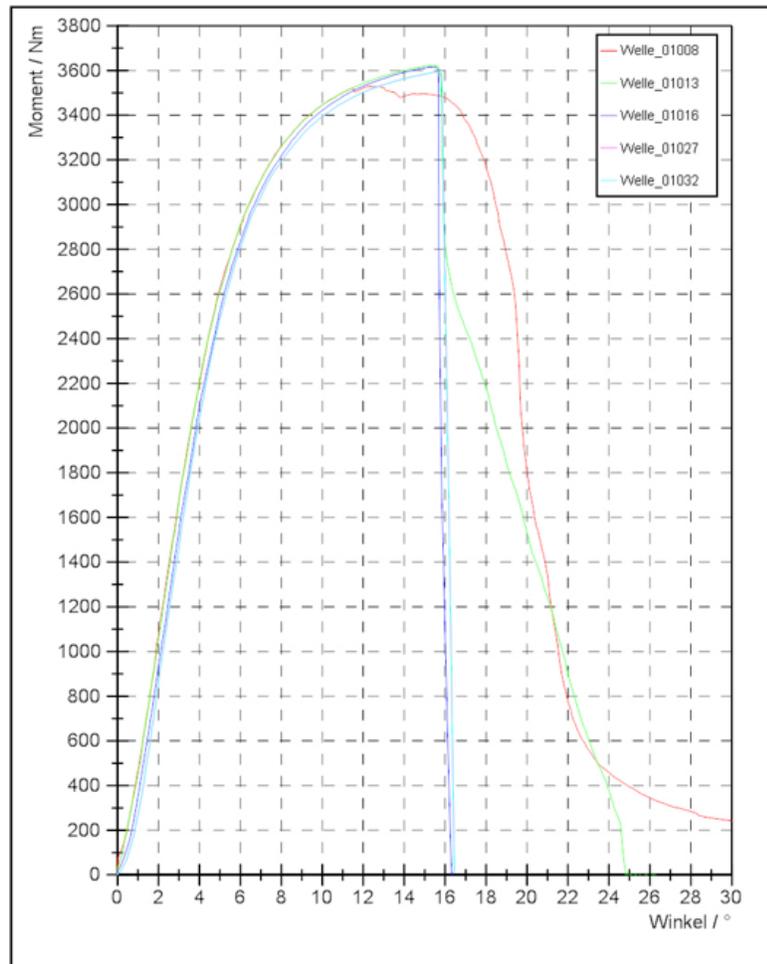


Abbildung 34: Moment / Verdrehwinkeldiagramm zu Nr. 124



Abbildung 35: Bruchbild zu Nr. 124

9. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei rotationssymmetrischen Kerben unter statischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge

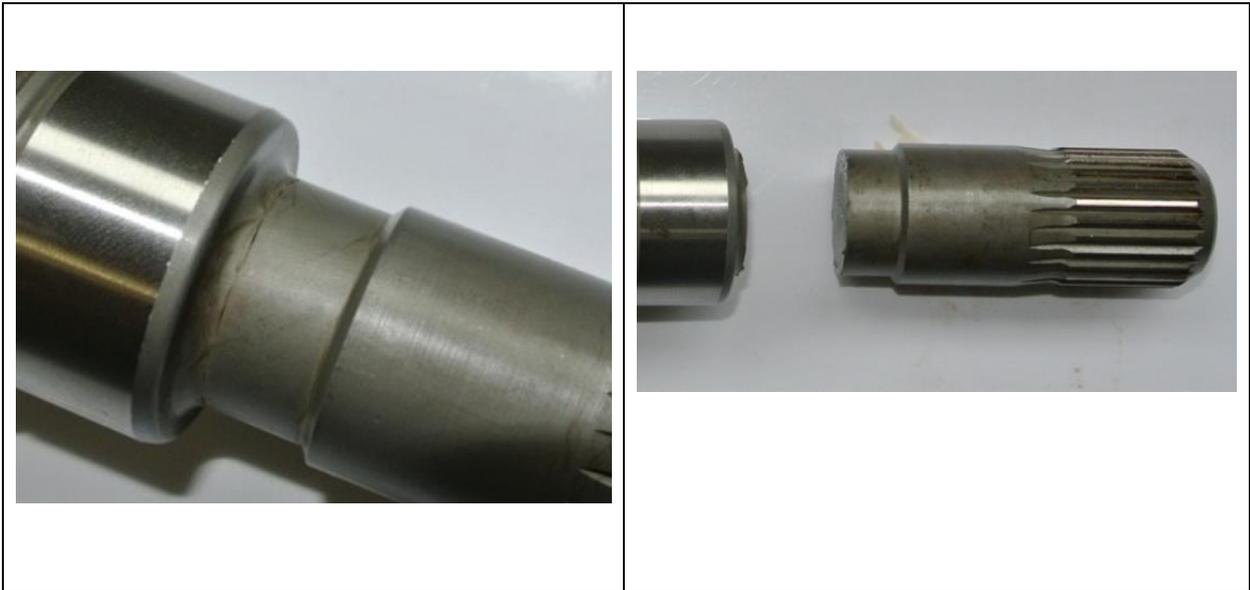


Abbildung 36: Bruchbilder zu Nr. 124

Einsatzgehärtete Antriebswelle aus 28MnCrB7-2, Bruchstelle Wellenabsatz

Datenbankeintrag Nummer 129

Material: 28MnCrB7-2

Oberflächenbehandlung: Einsatzgehärtet

Anzahl an statisch erprobten Bauteilen: 4

Geometrische Kerbe an der Bruchstelle: Wellenabsatz

Nenn Durchmesser: 25,14 mm

Bohrungsdurchmesser an Bruchstelle: 0 mm

Rundungsradius: 1,4 mm

Kernhärte Ist: 46,75 HRC

Tabelle zur Umwertung der Kernhärte in Festigkeit nach DIN 18265: A1

Zugfestigkeit im Kern, umgewertet aus Kernhärte: 1513 MPa

Oberflächenhärte Ist: 57,4 HRC

Zugfestigkeit der Oberfläche, umgewertet aus Oberflächenhärte in Anlehnung an DIN 18265: 2152 MPa

CHD 620 HV1: 0,67 mm

Durchschnittliches erreichtes Maximalmoment: 4092 Nm

Errechnete Sicherheit durch KISSsoft in Anlehnung an die FKM- Richtlinie mit der Kernhärte als Berechnungseingangswert: 0,67

Errechnete Sicherheit durch KISSsoft in Anlehnung an die FKM- Richtlinie mit der durch den Faktor 1,3 aufgewerteten Kernhärte als Berechnungseingangswert: 0,87

Errechnete Sicherheit durch FEMFAT, 2D FE- Modell: 0,86

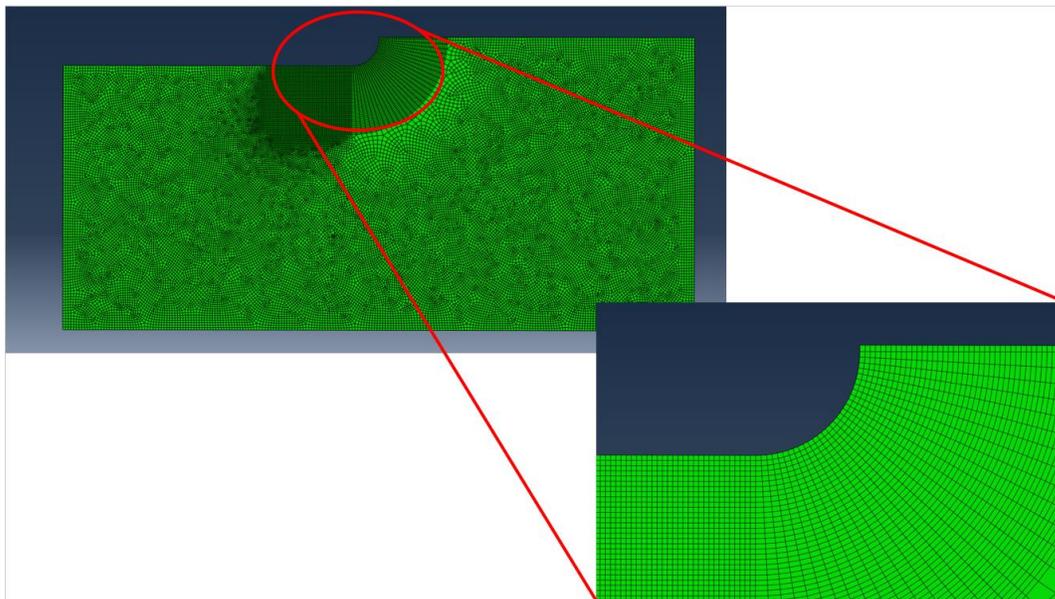


Abbildung 37: Modellaufbau zu Nr. 129

9. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei rotationssymmetrischen Kerben unter statischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge

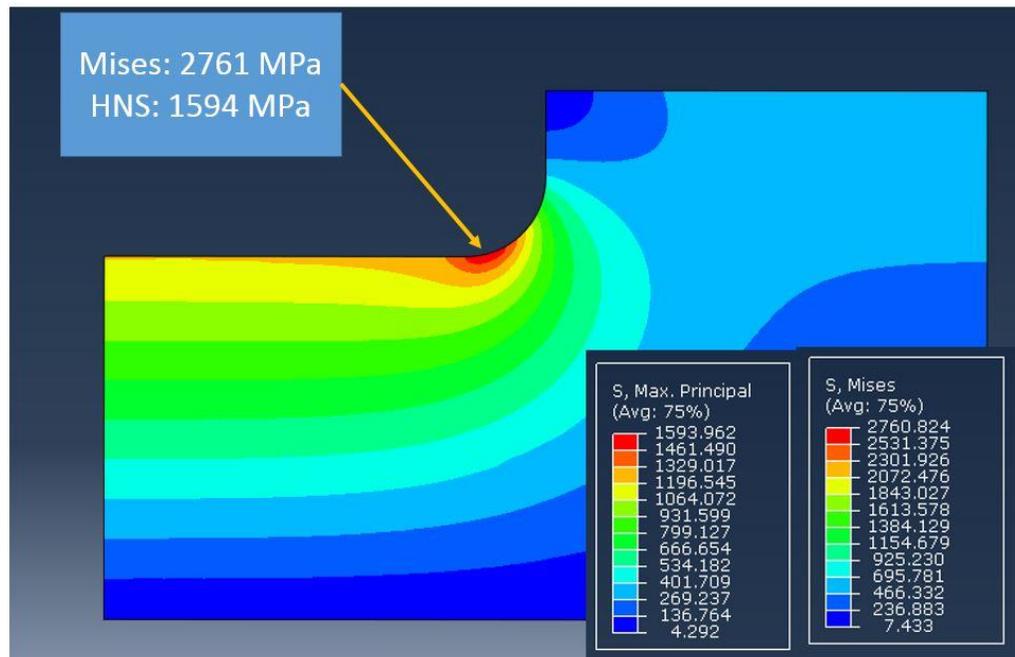


Abbildung 38: Spannungen zu Nr. 129

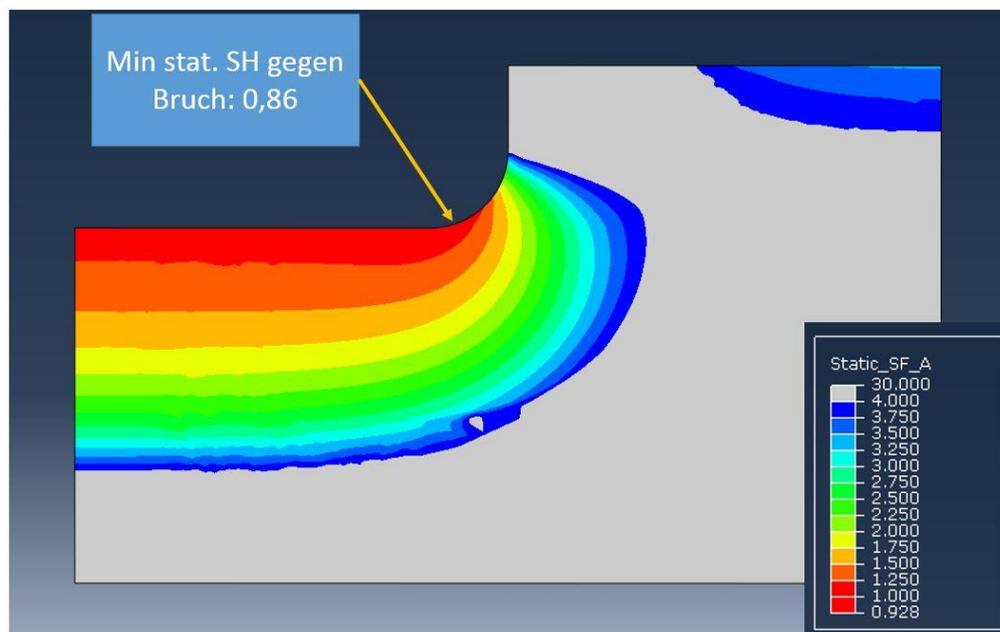


Abbildung 39: Errechnete Sicherheiten zu Nr. 129

9. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei rotationssymmetrischen Kerben unter statischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge

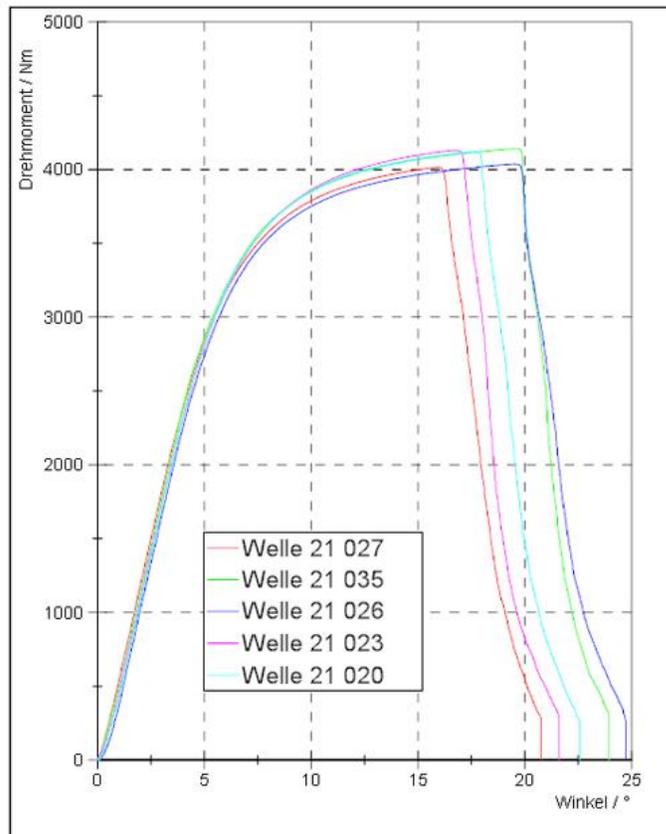


Abbildung 40: Moment / Verdrehwinkeldiagramm zu Nr. 129



Abbildung 41: Bruchbild zu Nr. 129

9. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei rotationssymmetrischen Kerben unter statischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge

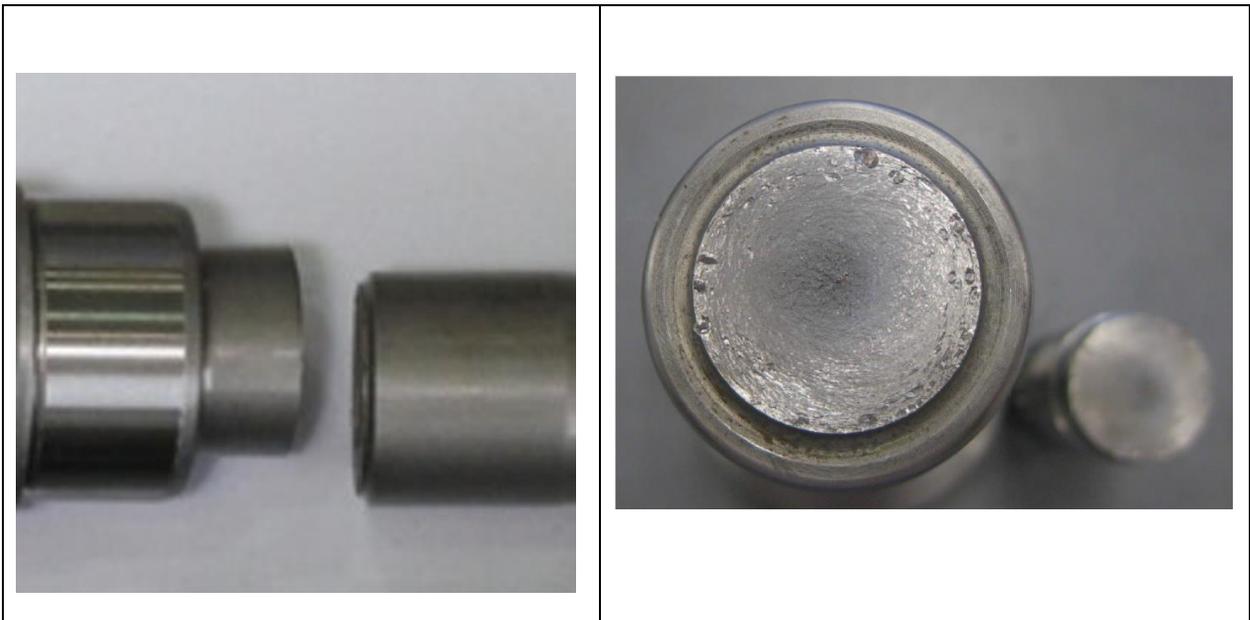


Abbildung 42: Bruchbilder zu Nr. 129

Einsatzgehärtete Antriebswelle aus 28MnCrB7-2, Bruchstelle Wellenabsatz
Datenbankeintrag Nummer 136

Material: 28MnCrB7-2

Oberflächenbehandlung: Einsatzgehärtet

Anzahl an statisch erprobten Bauteilen: 5

Geometrische Kerbe an der Bruchstelle: Wellenabsatz

Nenn Durchmesser: 28,64 mm

Bohrungsdurchmesser an Bruchstelle: 0 mm

Rundungsradius: 1,4 mm

Kernhärte Ist: 46,9 HRC

Tabelle zur Umwertung der Kernhärte in Festigkeit nach DIN 18265: A1

Zugfestigkeit im Kern, umgewertet aus Kernhärte: 1520 MPa

Oberflächenhärte Ist: 59,1 HRC

9. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei rotationssymmetrischen Kerben unter statischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge

Zugfestigkeit der Oberfläche, umgewertet aus Oberflächenhärte in Anlehnung an DIN 18265: 2279 MPa

CHD 620 HV1: 0,92 mm

Durchschnittliches erreichtes Maximalmoment: 6084 Nm

Errechnete Sicherheit durch KISSsoft in Anlehnung an die FKM- Richtlinie mit der Kernhärte als Berechnungseingangswert: 0,67

Errechnete Sicherheit durch KISSsoft in Anlehnung an die FKM- Richtlinie mit der durch den Faktor 1,3 aufgewerteten Kernhärte als Berechnungseingangswert: 0,87

Errechnete Sicherheit durch FEMFAT, 2D FE- Modell: 0,89

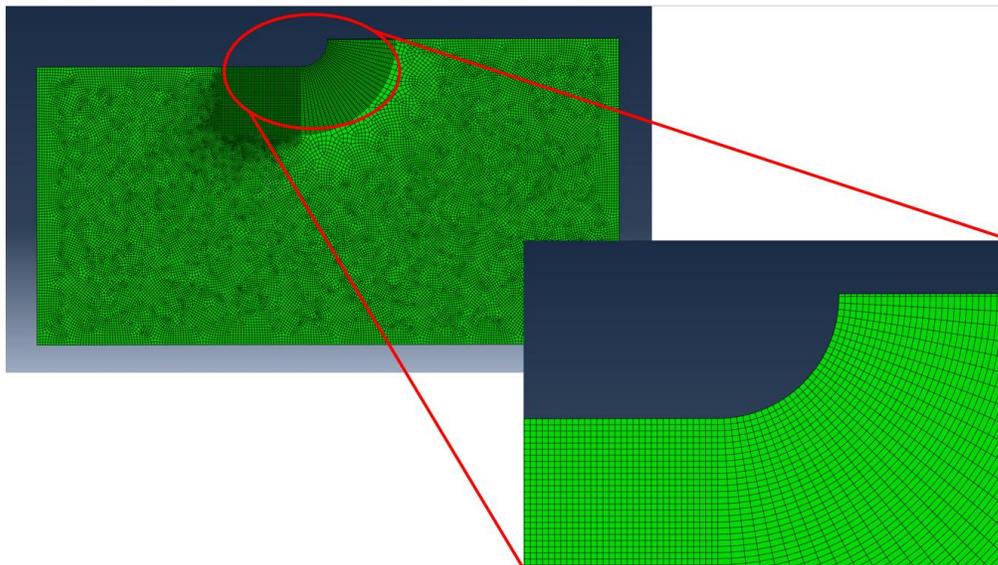


Abbildung 43: Modellaufbau zu Nr. 136

9. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei rotationssymmetrischen Kerben unter statischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge

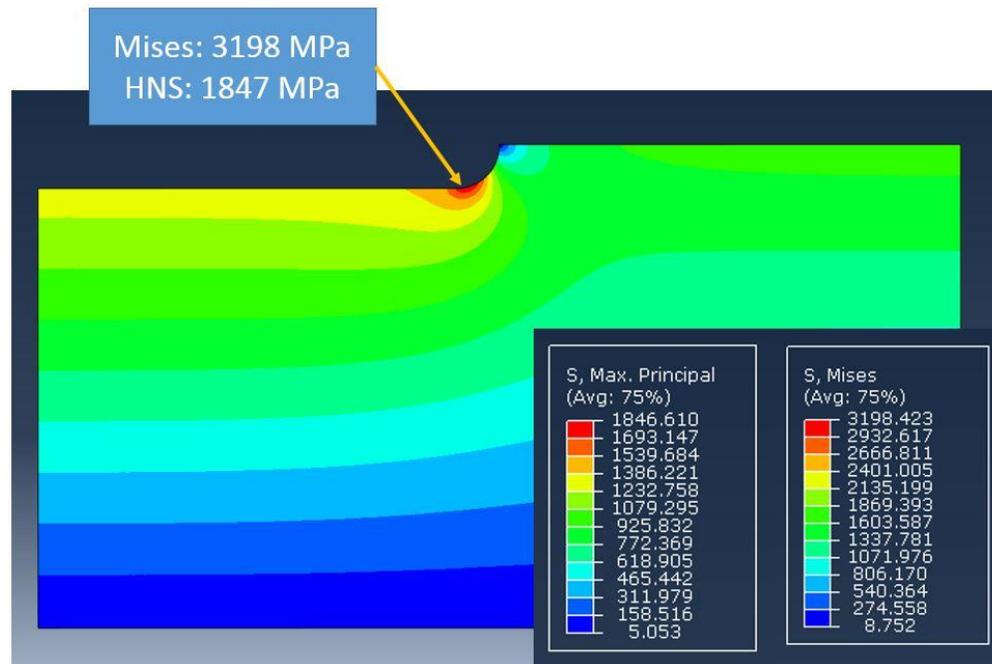


Abbildung 44: Spannungen zu Nr. 136

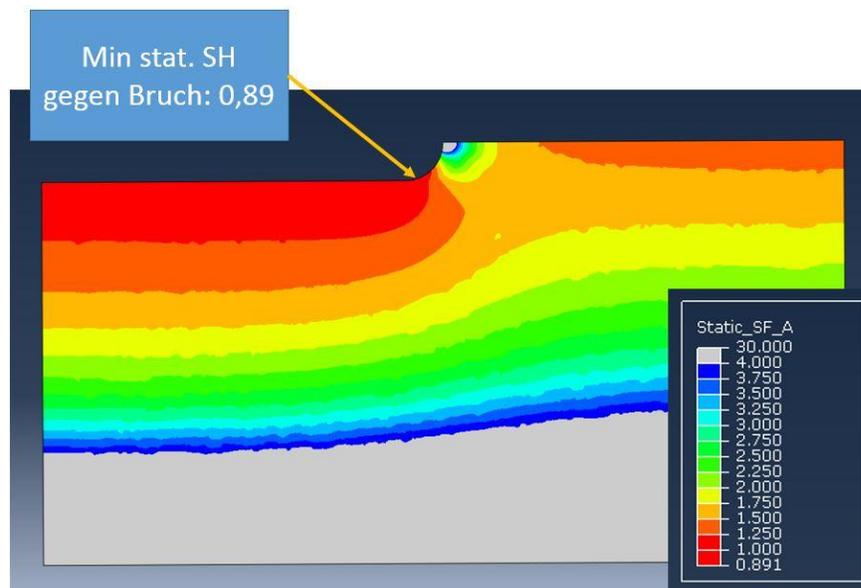


Abbildung 45: Errechnete Sicherheiten zu Nr. 136

9. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei rotationssymmetrischen Kerben unter statischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge

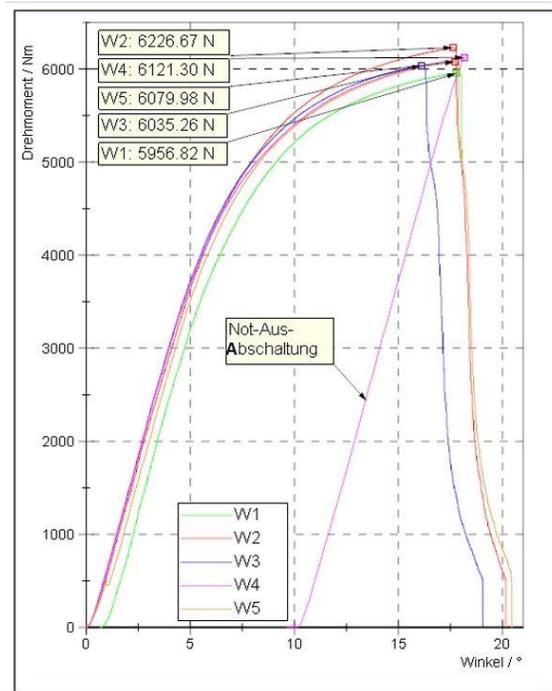


Abbildung 46: Moment / Verdrehwinkeldiagramm zu Nr. 136



Abbildung 47: Bruchbilder zu Nr. 136

9. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei rotationssymmetrischen Kerben unter statischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge

Einsatzgehärtete Antriebswelle aus 28MnCrB7-2, Bruchstelle Wellenabsatz

Datenbankeintrag Nummer 137

Material: 28MnCrB7-2

Oberflächenbehandlung: Einsatzgehärtet

Anzahl an statisch erprobten Bauteilen: 4

Geometrische Kerbe an der Bruchstelle: Wellenabsatz

Nenndurchmesser: 25,14 mm

Bohrungsdurchmesser an Bruchstelle: 0 mm

Rundungsradius: 1,4 mm

Kernhärte Ist: 46,75 HRC

Tabelle zur Umwertung der Kernhärte in Festigkeit nach DIN 18265: A1

Zugfestigkeit im Kern, umgewertet aus Kernhärte: 1513 MPa

Oberflächenhärte Ist: 57,4 HRC

Zugfestigkeit der Oberfläche, umgewertet aus Oberflächenhärte in Anlehnung an DIN 18265: 2152 MPa

CHD 620 HV1: 0,67 mm

Durchschnittliches erreichtes Maximalmoment: 4092 Nm

Errechnete Sicherheit durch KISSsoft in Anlehnung an die FKM- Richtlinie mit der Kernhärte als Berechnungseingangswert: 0,66

Errechnete Sicherheit durch KISSsoft in Anlehnung an die FKM- Richtlinie mit der durch den Faktor 1,3 aufgewerteten Kernhärte als Berechnungseingangswert: 0,86

Errechnete Sicherheit durch FEMFAT, 2D FE- Modell: 0,86

9. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei rotationssymmetrischen Kerben unter statischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge

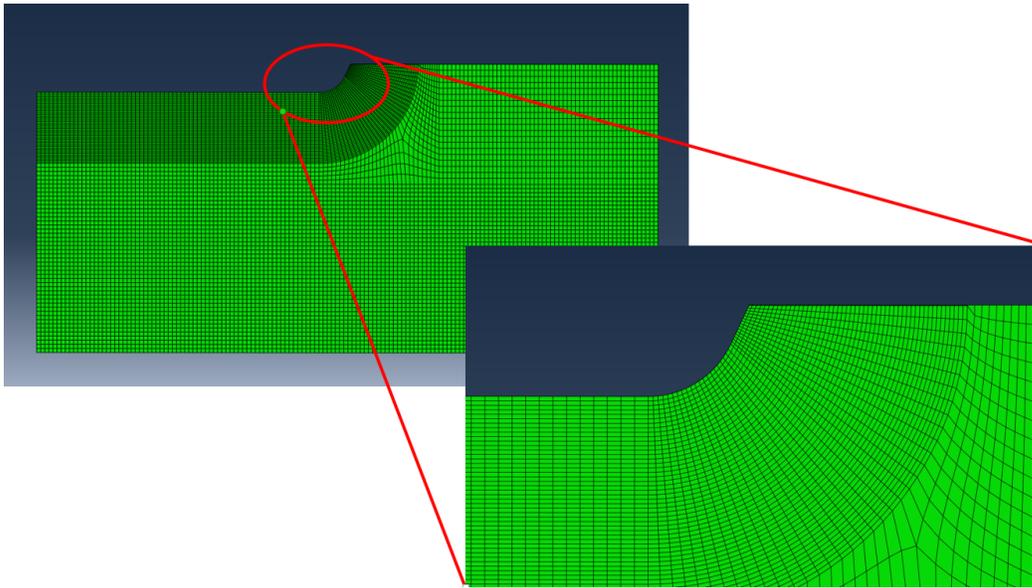


Abbildung 48: Modellaufbau zu Nr. 137

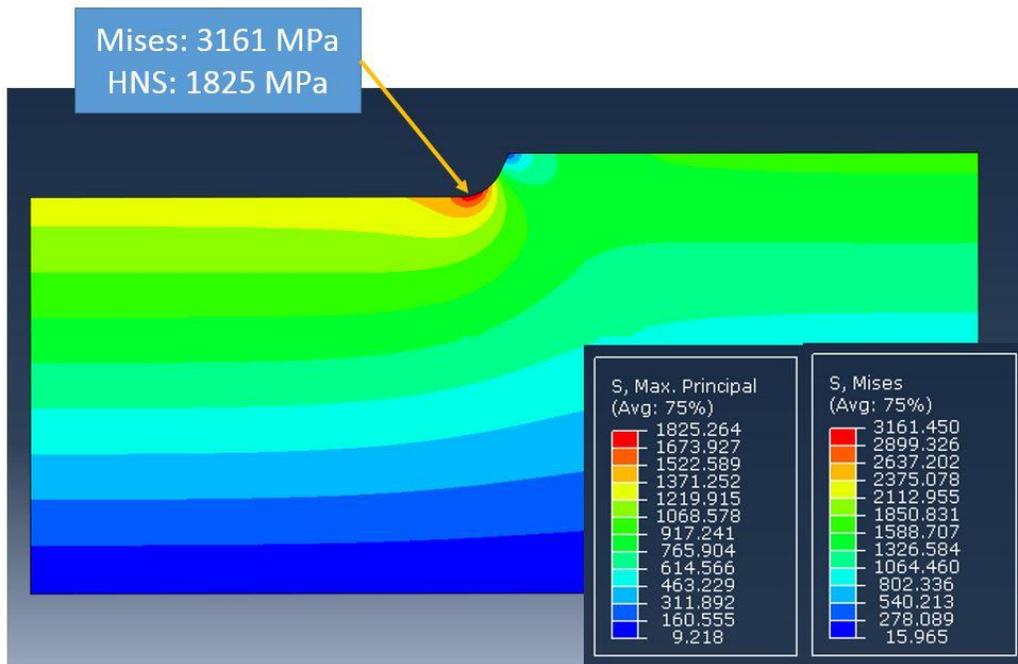


Abbildung 49: Spannungen zu Nr. 137

9. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei rotationssymmetrischen Kerben unter statischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge

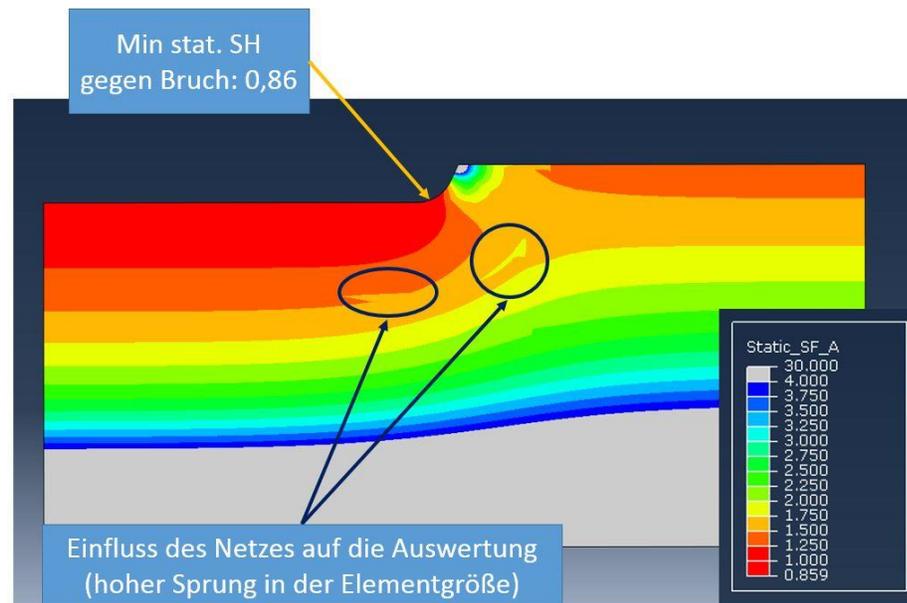


Abbildung 50: Errechnete Sicherheiten zu Nr. 137

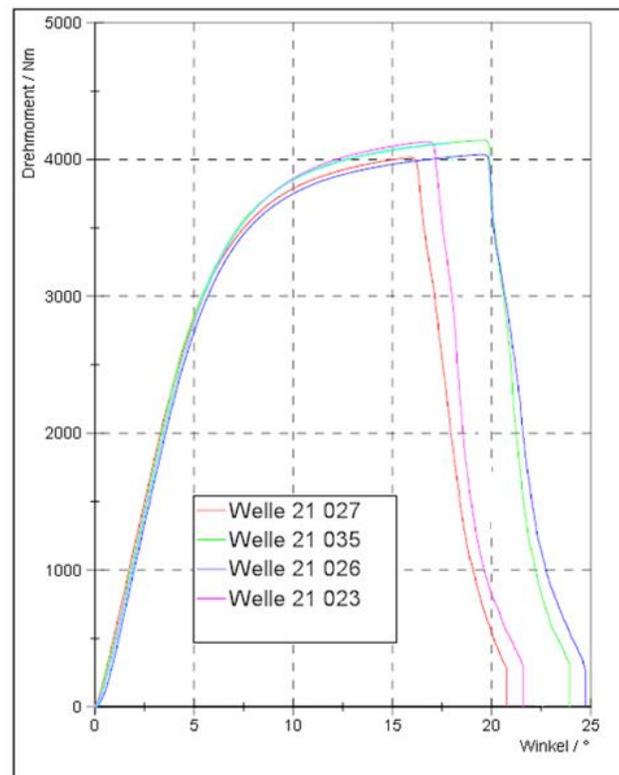


Abbildung 51: Moment / Verdrehwinkeldiagramm zu Nr. 137

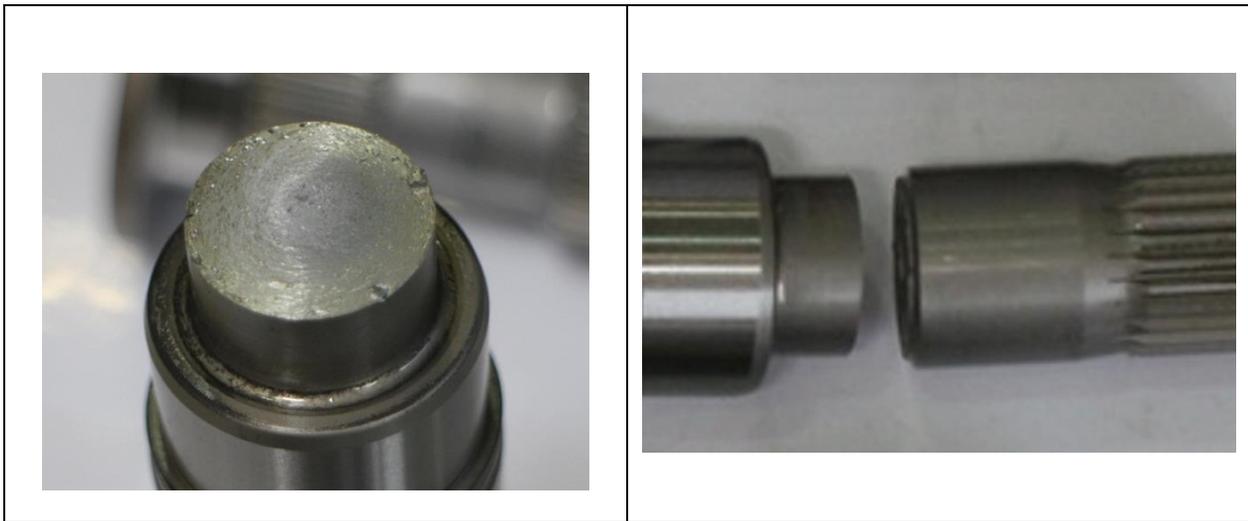


Abbildung 52: Bruchbilder zu Nr. 137

Einsatzgehärtete Antriebswelle aus 28MnCrB7-2, Bruchstelle Wellenabsatz

Datenbankeintrag Nummer 138

Material: 28MnCrB7-2

Oberflächenbehandlung: Einsatzgehärtet

Anzahl an statisch erprobten Bauteilen: 1

Geometrische Kerbe an der Bruchstelle: Sonderform eines Wellenabsatzes, freistichähnlich

Nenndurchmesser: 25,14 mm

Bohrungsdurchmesser an Bruchstelle: 0 mm

Rundungsradius: 4 mm, übergehend in 1,5 mm

Kernhärte Ist: 46,75 HRC

Tabelle zur Umwertung der Kernhärte in Festigkeit nach DIN 18265: A1

Zugfestigkeit im Kern, umgewertet aus Kernhärte: 1513 MPa

Oberflächenhärte Ist: 57,4 HRC

Zugfestigkeit der Oberfläche, umgewertet aus Oberflächenhärte in Anlehnung an DIN 18265: 2152 MPa

CHD 620 HV1: 0,67 mm

9. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei rotationssymmetrischen Kerben unter statischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge

Durchschnittliches erreichtes Maximalmoment: 4092 Nm

Errechnete Sicherheit durch KISSsoft in Anlehnung an die FKM- Richtlinie mit der Kernhärte als Berechnungseingangswert: 0,67

Errechnete Sicherheit durch KISSsoft in Anlehnung an die FKM- Richtlinie mit der durch den Faktor 1,3 aufgewerteten Kernhärte als Berechnungseingangswert: 0,87

Errechnete Sicherheit durch FEMFAT, 2D FE- Modell: 0,85

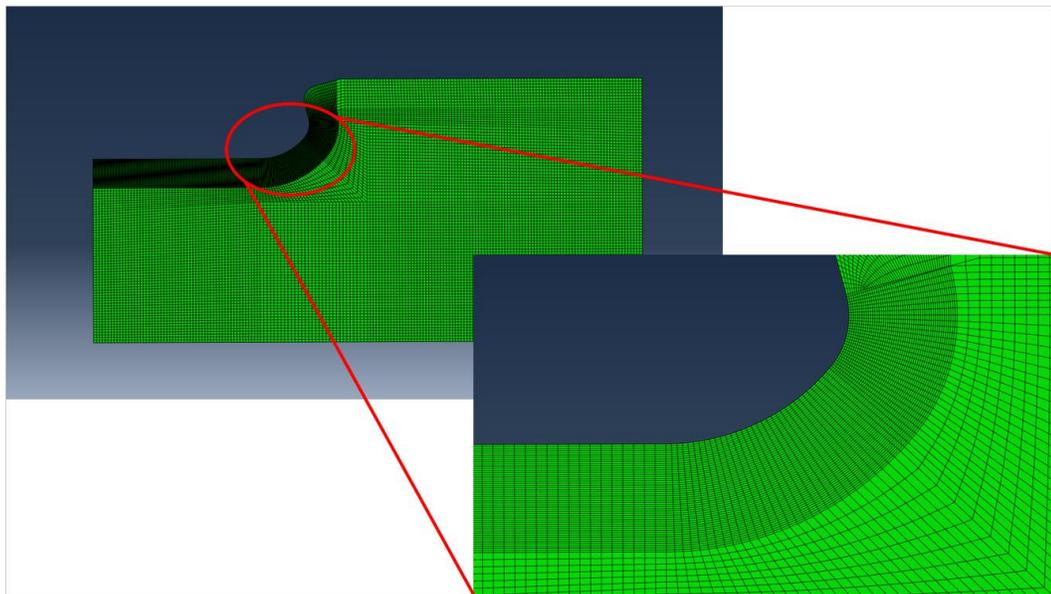


Abbildung 53: Modellaufbau zu Nr. 138

9. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei rotationssymmetrischen Kerben unter statischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge

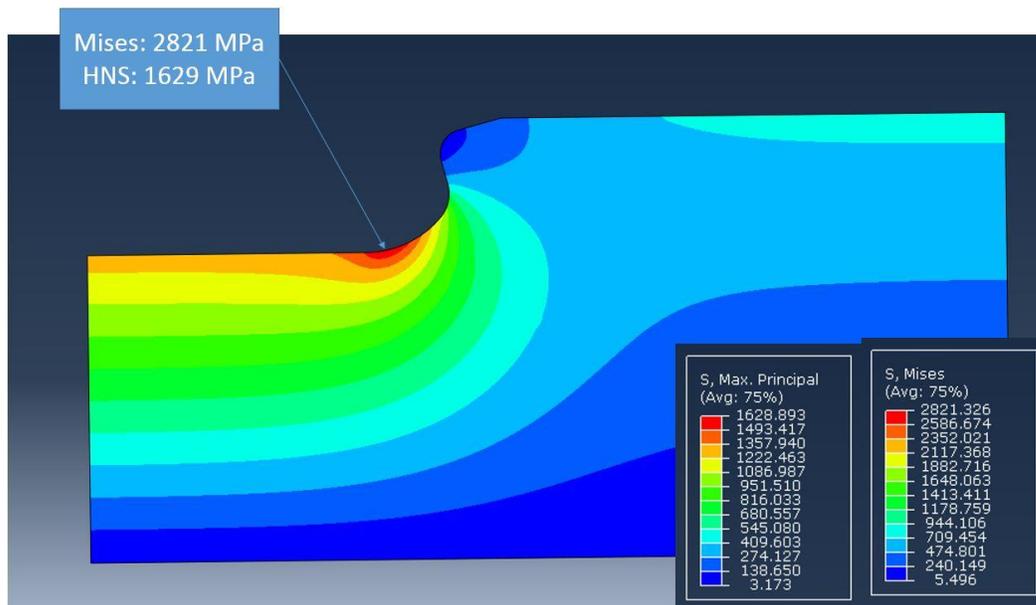


Abbildung 54: Spannungen zu Nr. 138

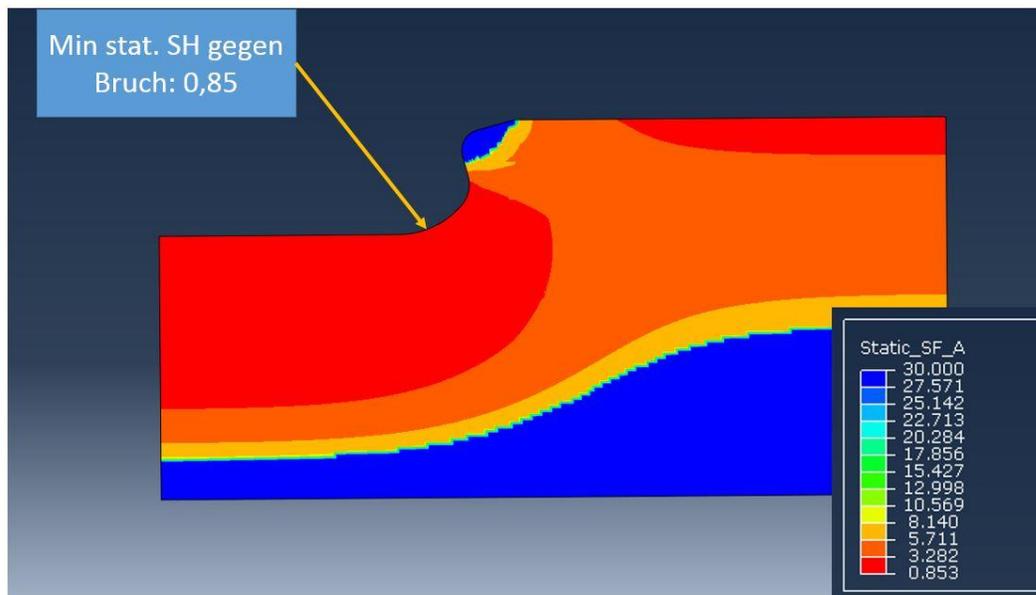


Abbildung 55: Errechnete Sicherheiten zu Nr. 138

9. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei rotationssymmetrischen Kerben unter statischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge

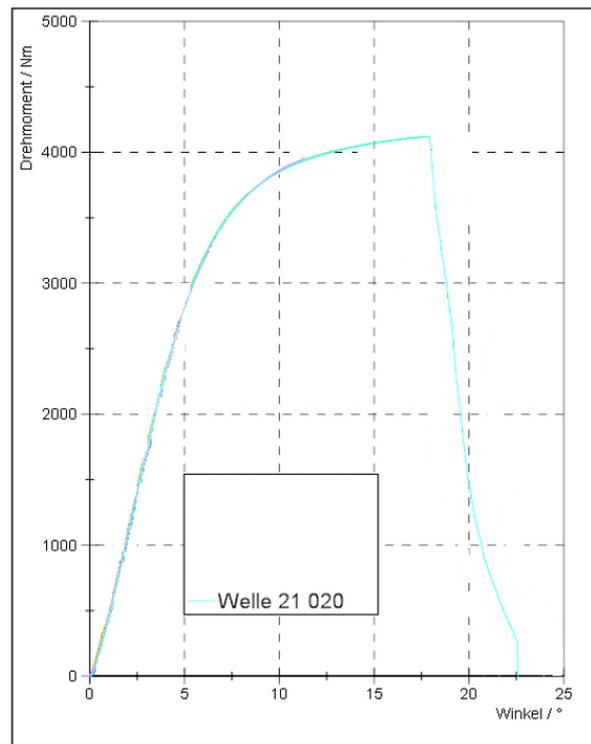


Abbildung 56: Moment / Verdrehwinkeldiagramm zu Nr. 138



Abbildung 57: Bruchbild zu Nr. 138

Diskussion der Ergebnisse

Für eine Gegenüberstellung aller Ergebnisse pauschal auf einen Blick, wodurch aber der genaue Blick ins Detail und die dahinterstehenden Erklärungen vorerst verloren geht, wurde ein Diagramm in der folgenden Form gewählt: Den Wert auf der Abszisse bildet die laufende Nummer des Versuchs in der Datenbank der Versuchsaufbereitungen. Hinter dieser Anordnung steckt somit keine weitere Bedeutung. Sie spiegelt lediglich die Reihenfolge wider, in der die Versuche anfielen bzw. aufbereitet wurden. Auf der Ordinate wird die durch die Berechnungsmethoden errechnete Sicherheit, bei Festigkeitsberechnung gegen die tatsächlich im Versuch ertragene Belastung, aufgetragen. Wie bereits diskutiert, ist der Begriff „Sicherheit“ hier nicht ganz korrekt. Besser geeignet wäre eine Bezeichnung wie „Kehrwert des Auslastungsgrads“, also $(1 / \text{Auslastungsgrad})$, wenn alle Sicherheitsfaktoren, die bei Berechnung nach FKM Richtlinie üblicherweise berücksichtigt werden, zu 1 gesetzt werden ($j_{ges}=1$ bzw. $j_s=j_w=j_m=j_p=j_{mt}=j_{pt}=j_D=j_G=1$). Da das Resultat sowohl bei KISSsoft als auch FEMFAT Berechnungen diese quasi- Sicherheiten sind und bei MPT Lannach Konvention sind, wurde dieses auch für die Auswertungen in dieser Arbeit übernommen.

Im Diagramm ist eine horizontale Linie beim Wert Sicherheit = 1 durchgezogen. Dieser soll jenen Bereich hervorheben, in dem es zur eins- zu- eins- Übereinstimmung zwischen Versuch und durchgeführter Nachrechnung kommen würde. Liegt die errechnete Sicherheit darunter, Sicherheit < 1, ist dies so zu verstehen, dass die Berechnung in diesem Fall auf der konservativeren Seite liegt und ein früheres Versagen gegenüber der Erprobung hervorgesagt hätte (der Auslastungsgrad würde über 1 betragen). Liegt die errechnete Sicherheit darüber, Sicherheit > 1, so würde dies ein zu optimistisches Berechnungsergebnis bedeuten, da die errechnete Auslastung trotz real in der Bauteilerprobung bereits vorhandenem Bruch noch unter 1 liegen würde.

Im Diagramm werden zwei Punktemengen gegenübergestellt. Die rote Punktemenge kennzeichnet die errechneten Sicherheiten bei Festigkeitsberechnung mittels 2D- FE- Berechnung. Die blaue Punktemenge stellt errechnete Sicherheiten durch Festigkeitsberechnung mit KISSsoft in Anlehnung an die FKM Richtlinie nach Nennspannungskonzept (Kapitel 1), dar.

Es ergibt sich folgendes Diagramm:

9. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei rotationssymmetrischen Kerben unter statischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge

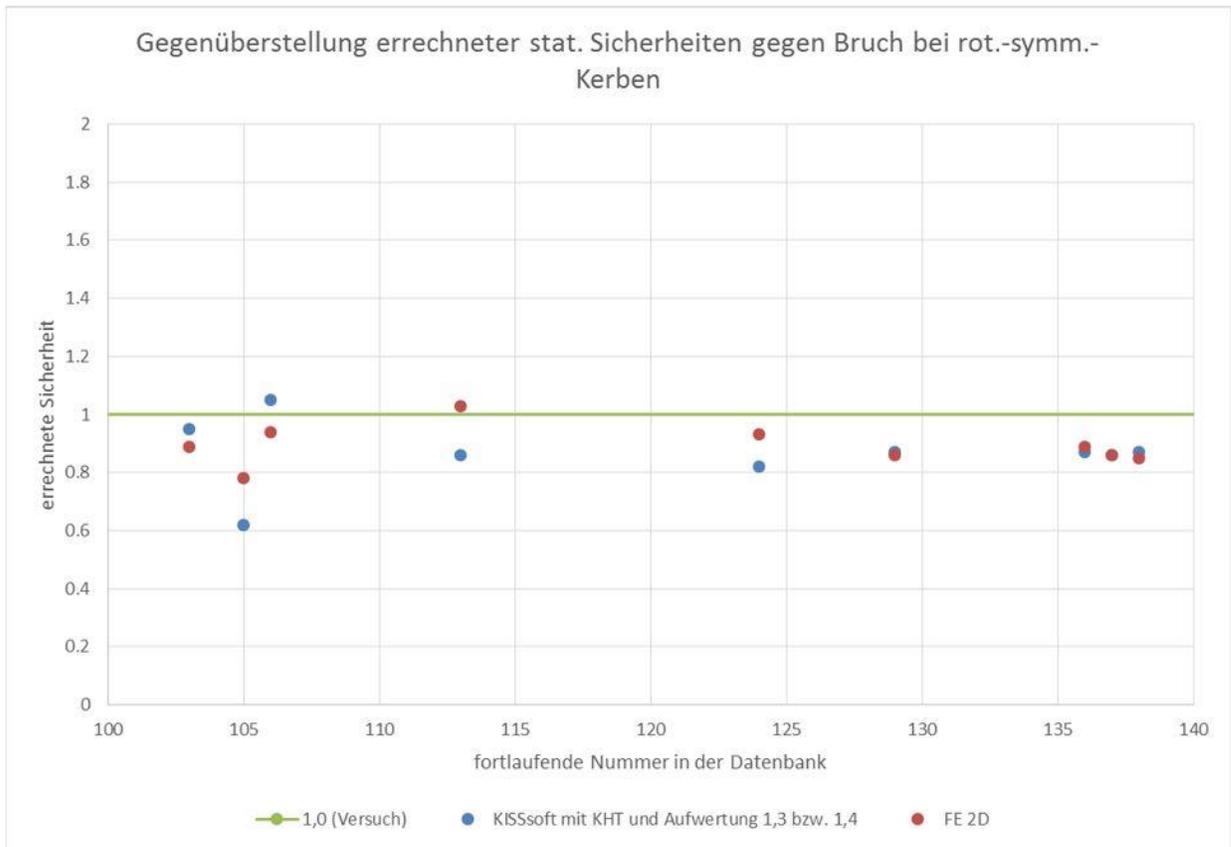


Abbildung 58: Gesamtergebnisse stat. SH rotationssymmetrischer Kerben

Grundsätzlich kann darüber zusammenfassend folgendes festgehalten werden: Eine Abweichung durch die Berechnungsmethodik, besonders durch Bewertung mithilfe von FEMFAT, tritt bei Kerbformen dieser Art für Begriffe der Betriebsfestigkeit grundsätzlich praktisch nicht auf. Schließlich sollte bedacht werden, dass alleine durch die Nachrechnung Abweichungen entstehen können: Bestes Beispiel ist etwa, dass gemessene Härtewerte für die Rechnung in Zugfestigkeit umgewertet wurden. Auch die Messungen selbst sind, wie alle Messungen, Streuungen unterworfen, weshalb Mittelwerte der Messungen verwendet wurden.

Zusammenfassend kann also festgehalten werden, dass wenn relativ genaue Angaben über tatsächlich zu erwartende Werkstoffkennwerte vorhanden sind, mithilfe der Berechnungsmethoden, richtig angewandt und ein paar Punkte beachtet, sehr treffende Aussagen über statische Bruchfestigkeit durch die Berechnung getroffen werden können. In Fällen, in denen die Abweichungen der hier nachgerechneten Erprobungen und Abgleiche zwischen Versuch und Berechnung höher als 15% bis 20% liegen, scheinen diese erklärbar zu sein. Da dahinter eine Systematik feststellbar zu sein scheint, werden im Folgenden ein

paar Hinweise zur Anwendung der Berechnungsmethoden gegeben. Darauf, und auf die Fragestellung, warum es trotzdem bei vergangenen Entwicklungsprozessen zu Abweichungen zwischen Berechnungen in Konzept- und Definitionsphasen und den Ergebnissen der in späteren Entwicklungsphasen durchgeführten Prototypenerprobungen gekommen ist, soll in den nächsten Absätzen eingegangen werden.

Beispielhaft für die erste Erklärung sollen die Datenbankeinträge (im Diagramm „fortlaufende Nummer in der Datenbank“ genannt) Nummer 105 und 106 betrachtet werden. Bei Datenbankeintrag Nummer 105, das zweite Punktepaar im obenstehenden Diagramm, ist die Abweichung zwischen Berechnung und Versuch am stärksten in die konservative Richtung für die Berechnung ausgeprägt. Wie im Kapitel der Einzelergebnisse zu dieser Nachrechnung zu entnehmen ist, handelt es sich hierbei um eine Welle, gefertigt aus vergleichsweise niedrigfestem C45E (im Gegensatz zu den meisten bei den anderen Bauteilen verwendeten Materialien, wo höherfestere Stähle zum Einsatz kamen). Dieser wies in der im Anschluss an die Erprobung durchgeführten werkstofftechnischen Analyse zur Bestimmung der Festigkeitswerte eine Kernhärte von 233 HV10, einer Oberflächenhärte von 58,0 HRC und einer Einhärtetiefe von EHT 480 HV1 = 2,75mm auf. Bei Umwertung dieser Härtewerte nach derzeit gültiger Norm, DIN EN ISO 18265:2014 [2], ergibt sich daraus eine Kernfestigkeit von 774 MPa und eine Oberflächenfestigkeit von 2195 MPa.

Datenbankeintrag Nummer 106, rechts daneben, mit einem Berechnungsergebnis, welches eher zu optimistisch zu sein scheint (vor allem bei Berechnung mit KISSsoft), wurde hingegen aus einem höherfesten, vergüteten 42CrMo4 mit einer ausgehend von den Härtemessungen umgewerteten Kernfestigkeit von 1032 MPa gefertigt. Die Festigkeit an der Oberfläche beträgt, ebenfalls ausgehend von den Härtemessungen umgewertet, etwa 2237 MPa. In beiden erwähnten Erprobungen (Datenbankeintrag 105 und 106) wurde die Oberfläche bzw. Randschicht also auf eine vergleichbar hohe Härte gehärtet (umgewertet liegen beide in etwa bei 2200 MPa).

Diese beispielhaften Abweichungen durch die Berechnung in KISSsoft lassen sich dadurch erklären, dass in dieser Berechnungsmethodik, so wie sie zum jetzigen Zeitpunkt angewendet wird, die Kernhärte unabhängig von ihrem ursprünglichen Wert mit dem Faktor 1,3 für einsatzgehärtete Randschicht bzw. 1,4 für induktionsgehärtete Randschicht aufgewertet wird. Das würde für den C45E also

$$774 * 1,4 = 1083,6 \text{ MPa}$$

betragen (Faktor 1,4 für die induktionsgehärtete Oberfläche). Für den vergüteten 42CrMo4 ergibt sich (Faktor 1,3 aufgrund der einsatzgehärteten Oberfläche)

$$1032 * 1,3 = 1341,6 \text{ MPa}$$

Das entspricht einer um etwa 24% niedrigeren Festigkeit für das Bauteil aus C45E als Eingangsparameter für die KISSsoft Berechnung, obwohl wie bereits erwähnt beide Bauteile eine in etwa gleich hohe Festigkeit an der Oberfläche aufweisen. Es scheint somit, dass es, an diesen beiden Bauteilen beispielhaft erklärt, durch Berechnung mit dieser Methodik in KISSsoft zur Unterschätzung der Festigkeit von Bauteilen aus niedrigfesten Stählen kommt, welche auf vergleichsweise hohe Oberflächenhärte gehärtet werden und

9. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei rotationssymmetrischen Kerben unter statischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge

bei denen der Bruch von der harten Randschicht aufgrund der Spannungsüberhöhung im Kerbgrund ausgeht.

Für zukünftige Anwendungen der Methodik könnte demnach überlegt werden, ob diese Aufwertung auch von der Differenz bzw. dem Verhältnis von Kernhärte zur Oberflächenhärte, und nicht wie bisher nur vom Härteverfahren bzw. der daraus zu erwartenden Einhärtetiefe abhängig gemacht wird.

Trotzdem kam es in der Vergangenheit zu Abweichungen zwischen in Konzept- und frühen Entwicklungsphasen durchgeführten Berechnungen und in späteren Entwicklungsphasen durchgeführten Versuchen. Das ist mit manchem „blinden“ Einsetzen in die Berechnungsmethoden zu erklären, wodurch sowohl Verschiebungen in die eine, als auch in die andere Richtung möglich sind.

Hierfür soll das untenstehende Bild eines Welleneinstichs betrachtet werden. Die Welle wurde zwar induktionsgehärtet, was auch in der Entwicklung so definiert wurde. Die Härtung im Kerbgrund, genau dort, wo sie eigentlich am stärksten gebraucht wäre aufgrund der Spannungskonzentration, ist allerdings nur unzureichend vorhanden, was sogar rein optisch im Schliff bereits erkennbar ist.



Abbildung 59: Induktionshärtung im Nutgrund

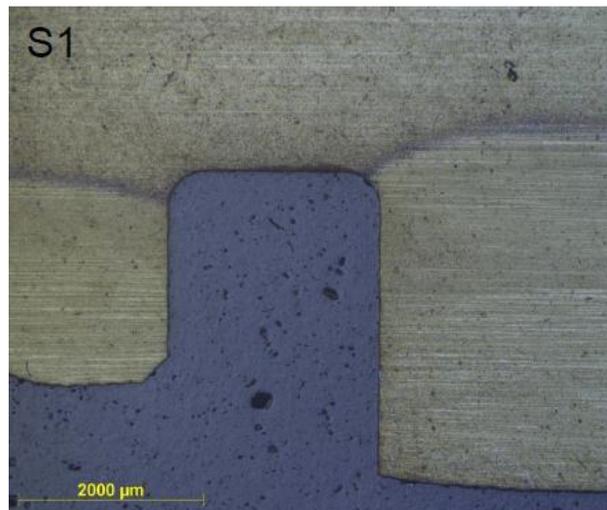


Abbildung 60: Induktionshärtung im Nutgrund

Ähnliches Phänomen zeigt die nächste Abbildung. Hier reicht die Härtung zwar auch bis an die Oberfläche des Kerbgrunds. Im 45° Winkel bei den Rundungsradien, wo wieder eine hohe Spannungskonzentration herrscht, ist die Einhärtetiefe allerdings wieder viel geringer. Bei Annahme korrekt vorhandener Härtung, auch im Nutbereich, kann dies auf zu optimistische Berechnungsergebnisse führen, da die Festigkeit überschätzt werden könnte.

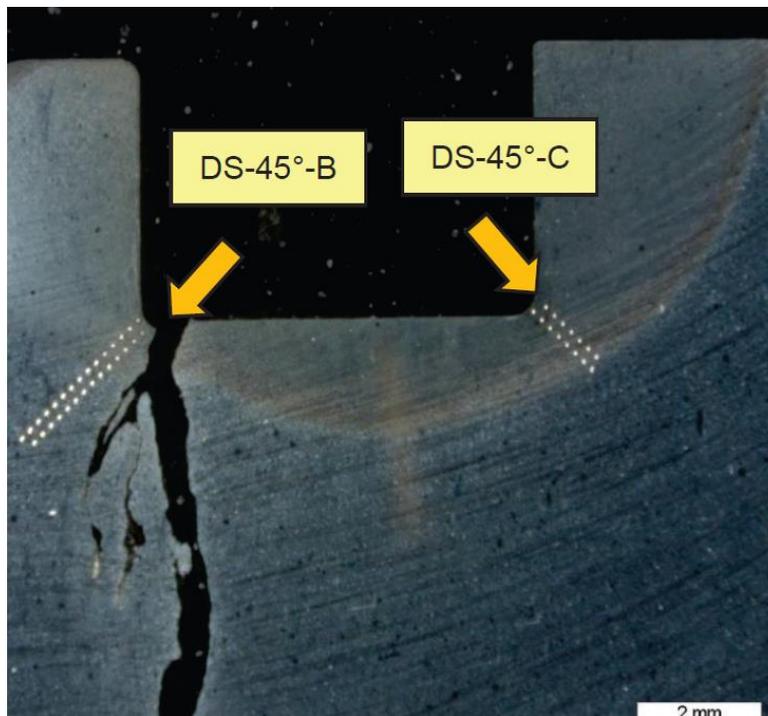


Abbildung 61: Induktionshärtung im Nutgrund

9. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei rotationssymmetrischen Kerben unter statischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge

Letztes Beispiel wird an der nächsten Abbildung erklärt. Zu sehen ist eine hohlgebohrte Welle, bei der aufgrund der Bohrer- Hauptschneiden Initialrisse erzeugt werden. Die Kerbwirkung wird dadurch stark verstärkt, was besonders in KISSsoft nicht berücksichtigt werden kann, da hierin keine Kerbenzahlen für Kerben an der Innenkontur vorhanden sind. Außerdem würde hier in einer Auslegungsphase der Nennquerschnitt wahrscheinlich nicht im ca. 45° ausgehend von den Bohrerkannten angesetzt werden, sondern wie üblich normal zur Rotationsachse. Der Riss startete in diesem Fall schlussendlich im weichen Kern.

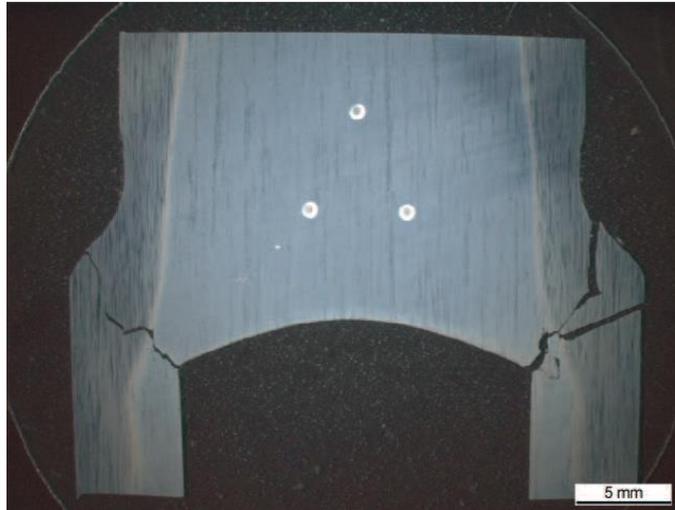


Abbildung 62: Rissverlauf

10. Über die Durchführung von Nachrechnungen statischer Erprobungen bei zyklisch symmetrischen Kerben: Steckverzahnungen

Besondere Aufmerksamkeit wurde in dieser Arbeit der Festigkeitsberechnung von Steckverzahnungen gewidmet. Diese werden als Welle- Nabe- Verbindungen zur formschlüssigen Übertragung von Drehmoment etwa auf Getriebewellen und ihr Gegenstück eingebracht. Auch der Begriff Passverzahnung ist üblich. In der Großserienfertigung werden diese üblicherweise in den noch relativ weichen Kernwerkstoff eingewalzt, das Bauteil wird danach bei Bedarf gehärtet und angelassen.



Abbildung 63: Steckverzahnung

10. Über die Durchführung von Nachrechnungen statischer Erprobungen bei zyklisch symmetrischen Kerben: Steckverzahnungen

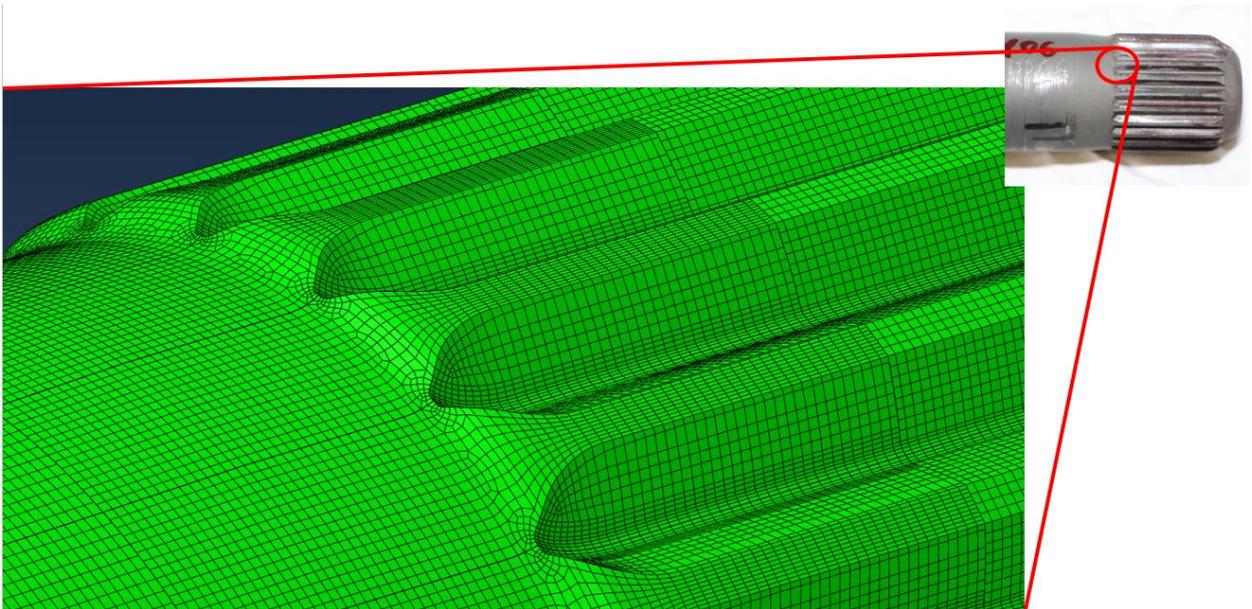


Abbildung 64: Steckverzahnung im FE-Modell

Die für die Nachrechnungen notwendigen Modelle wurden ausgehend von einer CAD- Geometrie in Abaqus CAE, Version 2016, vernetzt. Die Netze wurden in .inp- Files (Solver- Input- Files für den Abaqus Solver) ausgeschrieben und dann weiter in der Software Hypermesh bearbeitet. Darin wurden Flächen, Knoten- und Elementsets definiert. Alles Weitere wie Kontaktdefinitionen, Materialzuweisungen, Definition von Randbedingungen und Lasten wurde manuell in den daraus ausgeschriebenem .inp- files im Editor „Notepad ++“ eingebracht.

Diese nicht- rotationssymmetrischen Kerben, die aber immerhin noch zyklische Symmetrie aufwiesen, wurden mittels 3D- FE- Modellen abgebildet. Hier wurden grundsätzlich „Tortenstückmodelle“ aufgebaut, also ein Zahn der Steckverzahnung herausgeschnitten und zyklische Symmetrie ausgenutzt. Einen typischen Modellaufbau zeigt die untenstehende Abbildung.

10. Über die Durchführung von Nachrechnungen statischer Erprobungen bei zyklisch symmetrischen Kerben: Steckverzahnungen

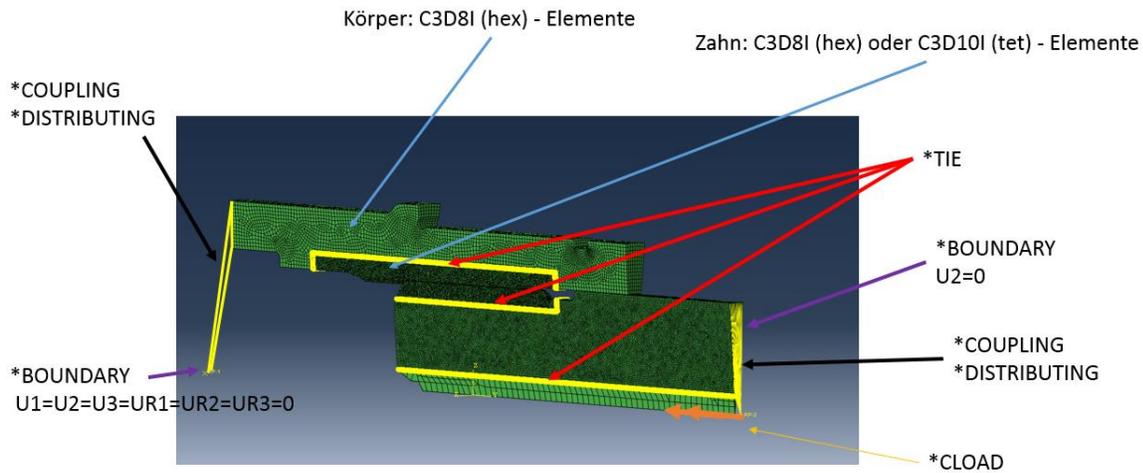


Abbildung 65: Modellaufbau FE 3D

Grundsätzlich wurden diese Modelle also auch ähnlich zu den 2D- Modellen aufgebaut: Auf beiden Seiten (einmal auf der Stirnfläche des Wellenmodells, einmal auf der Stirnfläche auf der anderen Seite, also jener der Nabe bzw. des Adapters) wurden die Elementflächen mittels „distributing coupling“ (Abaqus Keyword `*coupling *distributing`) mit jeweils einem Achspunkt verbunden. Im Falle der Steckverzahnung musste im Gegensatz zu den rotationssymmetrischen Kerben im FE Modell der Kontakt mit dem Gegenpart mitmodelliert werden, da sich die kritische Stelle nahe am Kontakt ergibt und somit eine Lastaufbringung mittels „Coupling“ direkt auf der Zahnflanke nicht mehr infrage kommt. Auf den einen Referenzpunkt wurde das Drehmoment mittels „concentrated force“ (Abaqus Keyword `*load`) aufgebracht, der Referenzknoten für die Stirnfläche des Adapters wurde in allen Freiheitsgraden gesperrt (`*boundary, 1, 6, 0`). Die Grundkörper der Bauteile wurden mittels C3D8I (linearen Hexaeder-) Elementen vernetzt, die Zähne mit C3D10 (quadratischen Tetraeder-) Elementen. In 6 Modellen wurden parallel dazu Vergleichsmodelle erstellt, in denen die Zähne ebenfalls mit C3D8I (linearen Hexaeder-) bzw. C3D20 (quadratischen Hexaeder-) Elementen vernetzt wurden. Die meist viel feiner vernetzten Zähne wurden dann mittels „Tie“ (Abaqus Keyword `*tie`) an den Grundkörper „geklebt“. Die durchschnittliche Elementgröße im Bereich der Zähne liegt bei einer Elementkantenlänge von etwa 0,2mm. Es wurde darauf geachtet, dass im Fußrundungsradius der Zähne etwa 6 Elemente liegen (was in kürzeren Elementkantenlängen als 0,2 in diesem Bereich resultiert). Die Kontaktformulierung wurde durch den „contact pair“- Algorithmus, „type = surface to surface“ definiert. Um nicht Abweichungen durch verzerrte Elemente zu generieren, wurde darauf geachtet, im gesamten Modell 0 Fehler und 0 Warnungen beim Element- Check durch den in Abaqus CAE implementierten „Abaqus Element Quality Check“ zu erhalten.

Verwendet wurde Abaqus Version 2016, Solver ist Abaqus 3DEXPERIENCE R2016x.

11. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei zyklisch symmetrischen Kerben unter statischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge: Steckverzahnungen

Einsatzgehärtete Antriebswelle aus 20MnCrS5

Datenbankeintrag Nummer 118_147

Material: 20MnCrS5

Oberflächenbehandlung: Einsatzgehärtet

Anzahl an statisch erprobten Bauteilen: 1

Geometrische Kerbe an der Bruchstelle: Steckverzahnungsauslauf

Zähnezahl: 37

Fußkreisdurchmesser: 28,38 mm

Kopfkreisdurchmesser: 30,17 mm

Normalmodul: 0,79375

Bohrungsdurchmesser an Bruchstelle: 0mm

Kernhärte Ist: 39,55 HRC

Tabelle zur Umwertung der Kernhärte in Festigkeit nach DIN 18265: A1

Zugfestigkeit im Kern, umgewertet aus Kernhärte: 1246 MPa

Oberflächenhärte Ist: 59,6 HRC

Zugfestigkeit der Oberfläche, umgewertet aus Oberflächenhärte in Anlehnung an DIN 18265: 2318 MPa

CHD 550 HV1: 0,85 mm

Erreichtes Maximalmoment: 5221 Nm

Errechnete Sicherheit durch KISSsoft in Anlehnung an die FKM- Richtlinie, Kapitel 1, mit der um den Faktor 1,3 aufgewerteten Kernhärte als Berechnungseingangswert: 0,95

Errechnete Sicherheit durch FEMFAT, 3D FE- Modell, Elementtyp Tetraeder C3D10: 0,57

11. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei zyklisch symmetrischen Kerben unter statischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge: Steckverzahnungen

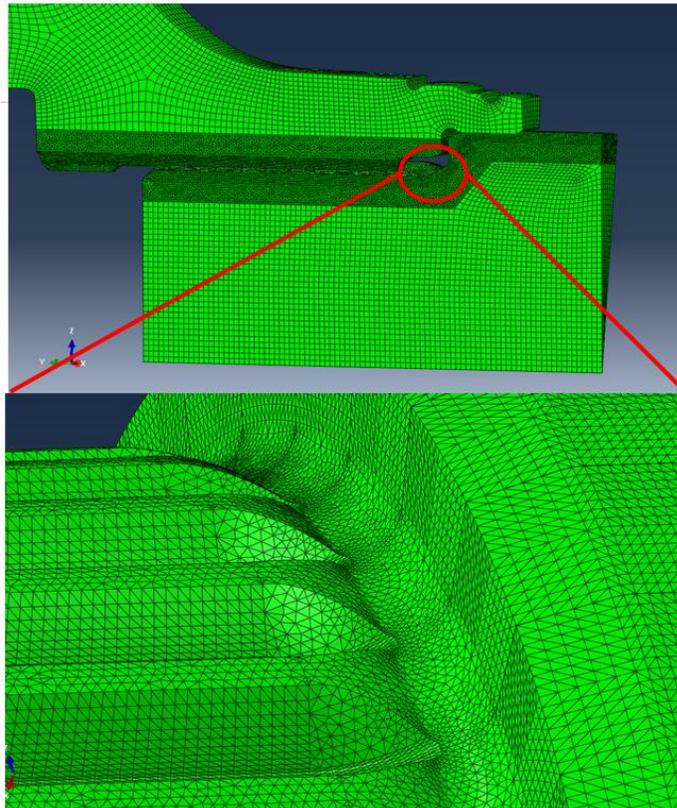


Abbildung 66: Modellaufbau zu Nr. 118_147

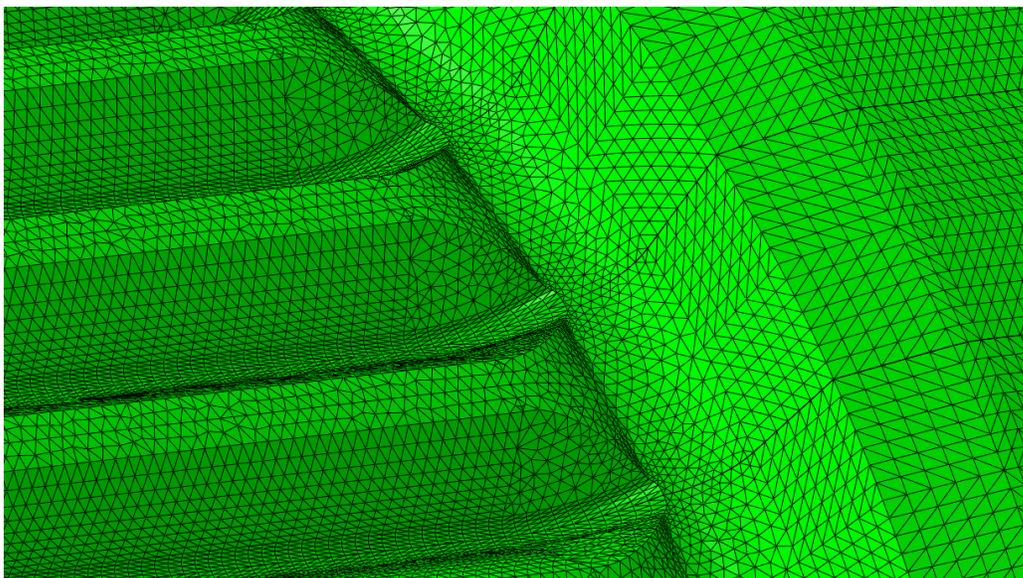


Abbildung 67: Modell zu Nr. 118_147

11. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei zyklisch symmetrischen Kerben unter statischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge: Steckverzahnungen

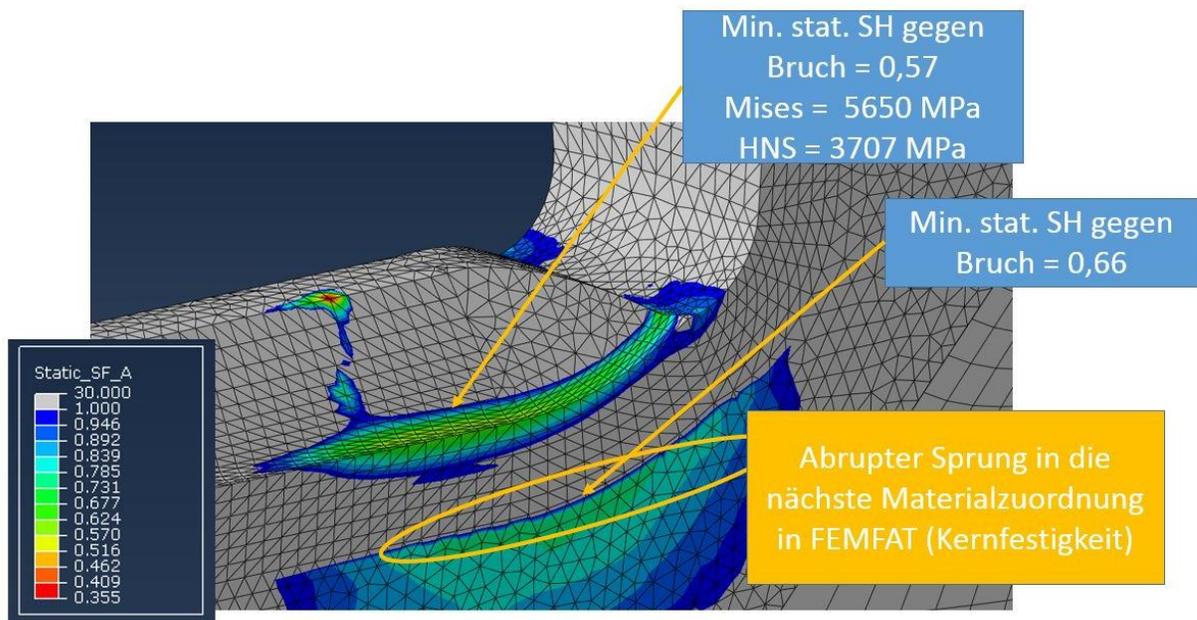


Abbildung 68: Spannungen zu Nr. 118_147

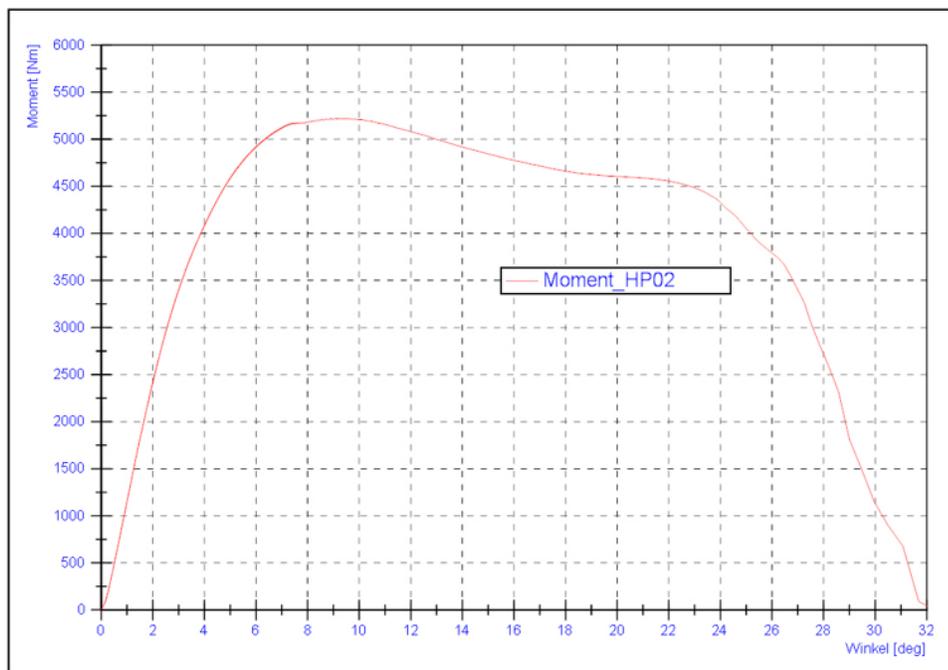


Abbildung 69: Moment / Verdrehwinkeldiagramm zu Nr. 118_147

11. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei zyklisch symmetrischen Kerben unter statischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge: Steckverzahnungen



Abbildung 70: Bruchbild zu Nr. 118_147

Einsatzgehärtete Kettenradwelle aus 20MnCr5

Datenbankeintrag Nummer 118_148

Material: 20MnCr5

Oberflächenbehandlung: Einsatzgehärtet

Anzahl an statisch erprobten Bauteilen: 4

Geometrische Kerbe an der Bruchstelle: Steckverzahnungsauslauf

Zähnezahl: 34

Fußkreisdurchmesser: 25,96 mm

Kopfkreisdurchmesser: 27,8 mm

Normalmodul: 0,79375 mm

Bohrungsdurchmesser an Bruchstelle: 0 mm

Kernhärte Ist: 42,7 HRC

11. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei zyklisch symmetrischen Kerben unter statischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge: Steckverzahnungen

Tabelle zur Umwertung der Kernhärte in Festigkeit nach DIN 18265: A1

Zugfestigkeit im Kern, umgewertet aus Kernhärte: 1350 MPa

Oberflächenhärte Ist: 60,99 HRC

Zugfestigkeit der Oberfläche, umgewertet aus Oberflächenhärte in Anlehnung an DIN 18265: 2430 MPa

CHD 550 HV1: 0,99 mm

Durchschnittlich erreichtes Maximalmoment: 4060 Nm

Errechnete Sicherheit durch KISSsoft in Anlehnung an die FKM- Richtlinie, Kapitel 1, mit der um den Faktor 1,3 aufgewerteten Kernhärte als Berechnungseingangswert: 0,94

Errechnete Sicherheit durch FEMFAT, 3D FE- Modell, Elementtyp Tetraeder C3D10: 0,63

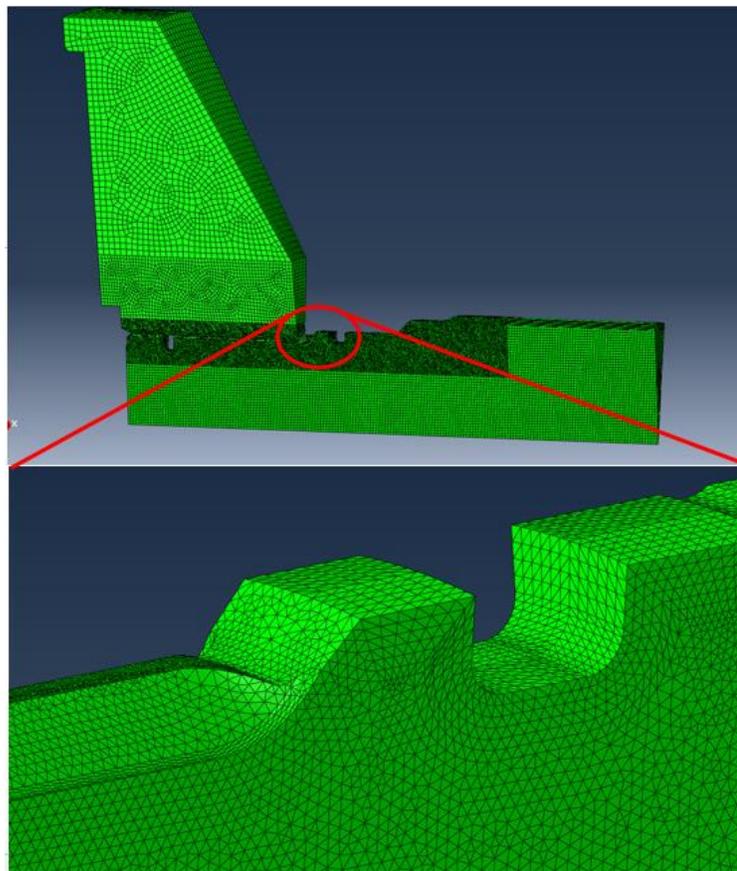


Abbildung 71: Modellaufbau zu Nr. 118_148

11. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei zyklisch symmetrischen Kerben unter statischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge: Steckverzahnungen

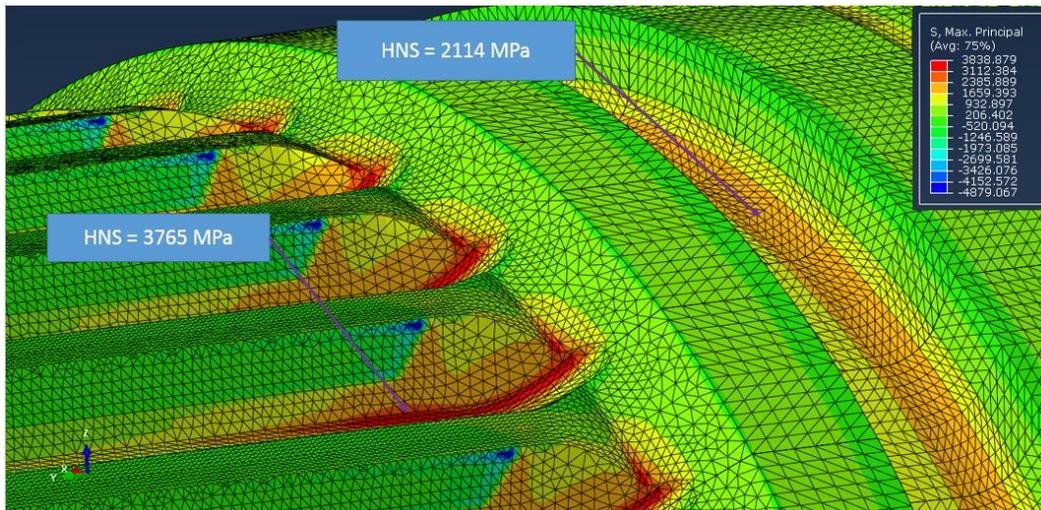


Abbildung 72: Spannungen zu Nr. 118_148

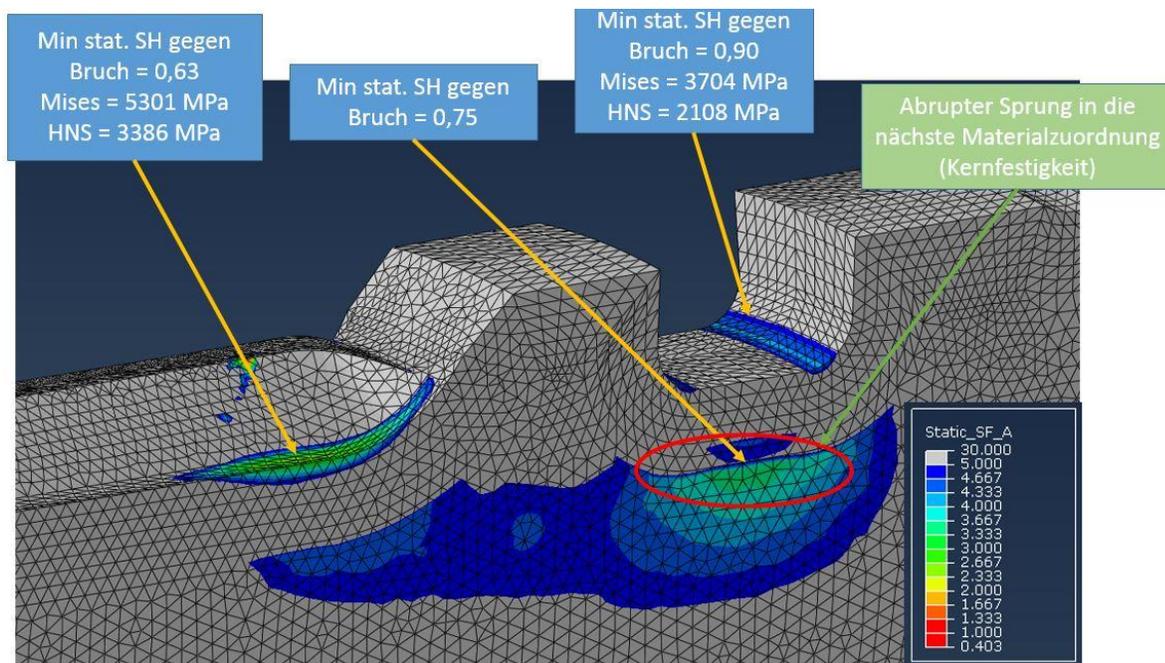


Abbildung 73: Errechnete Sicherheiten zu Nr. 118_148

11. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei zyklisch symmetrischen Kerben unter statischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge: Steckverzahnungen



Abbildung 74: Bruchbild zu Nr. 118_148

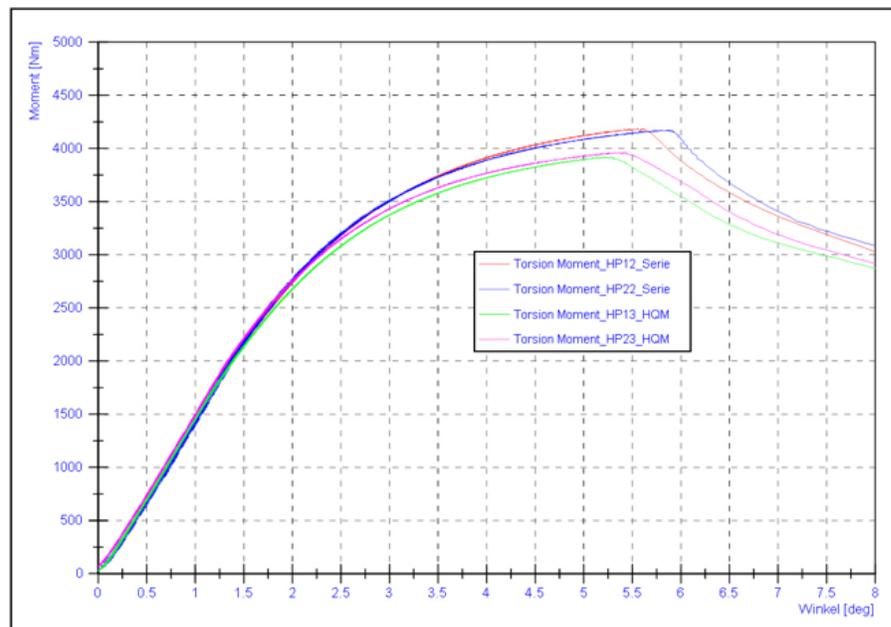


Abbildung 75: Moment / Verdrehwinkeldiagramm zu Nr. 118_148

11. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei zyklisch symmetrischen Kerben unter statischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge: Steckverzahnungen

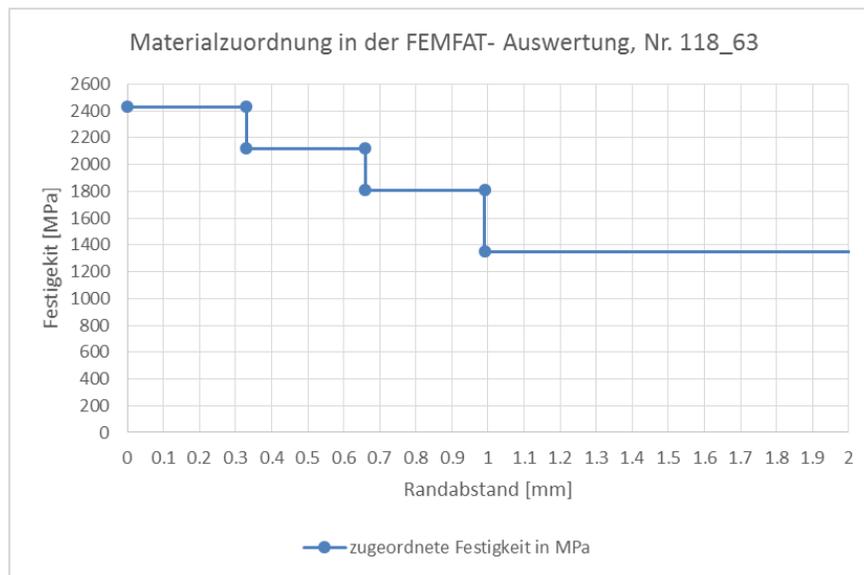


Abbildung 76: Materialzuordnung in FEMFAT, Nr. 118_63

Einsatzgehärtete Antriebswelle aus 28MnCrB7-2

Datenbankeintrag Nummer 156_146

Material: 28MnCrB7-2

Oberflächenbehandlung: Einsatzgehärtet

Anzahl an statisch erprobten Bauteilen: 2

Geometrische Kerbe an der Bruchstelle: Steckverzahnungsauslauf

Zähnezahl: 43

Fußkreisdurchmesser: 32,6 mm

Kopfkreisdurchmesser: 33,17 mm

Normalmodul: 0,79375 mm

Bohrungsdurchmesser an Bruchstelle: 0 mm

Kernhärte Ist: 48,1 HRC

Tabelle zur Umwertung der Kernhärte in Festigkeit nach DIN 18265: A1

Zugfestigkeit im Kern, umgewertet aus Kernhärte: 1578 MPa

Oberflächenhärte Ist: 59,8 HRC

11. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei zyklisch symmetrischen Kerben unter statischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge: Steckverzahnungen

Zugfestigkeit der Oberfläche, umgewertet aus Oberflächenhärte in Anlehnung an DIN 18265: 2334 MPa

CHD 620 HV1: 0,56 mm

Durchschnittlich erreichtes Maximalmoment: 7531 Nm

Errechnete Sicherheit durch KISSsoft in Anlehnung an die FKM- Richtlinie, Kapitel 1, mit der um den Faktor 1,3 aufgewerteten Kernhärte als Berechnungseingangswert: 0,9

Errechnete Sicherheit durch FEMFAT, 3D FE- Modell, Elementtyp lin. Hexaeder C3D8I: 0,68

Errechnete Sicherheit durch FEMFAT, 3D FE- Modell, Elementtyp quadr. Hexaeder C3D20: 0,68

Errechnete Sicherheit durch FEMFAT, 3D FE- Modell, Elementtyp Tetraeder C3D10: 0,68

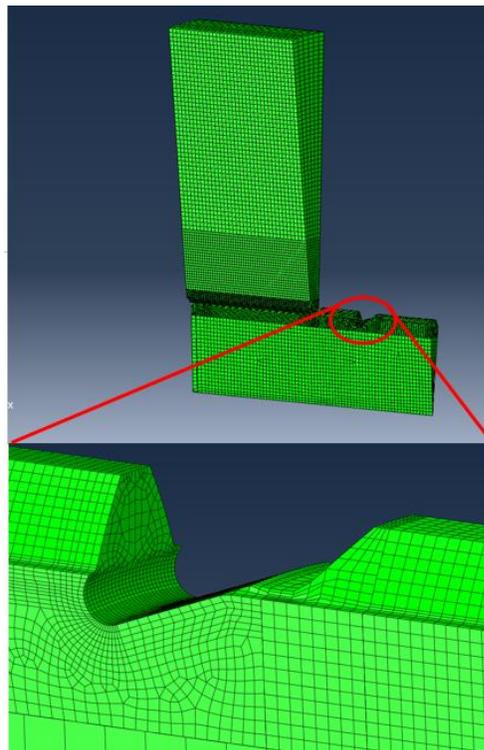


Abbildung 77: Modellaufbau zu Nr. 156_146 Hexaeder

11. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei zyklisch symmetrischen Kerben unter statischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge: Steckverzahnungen

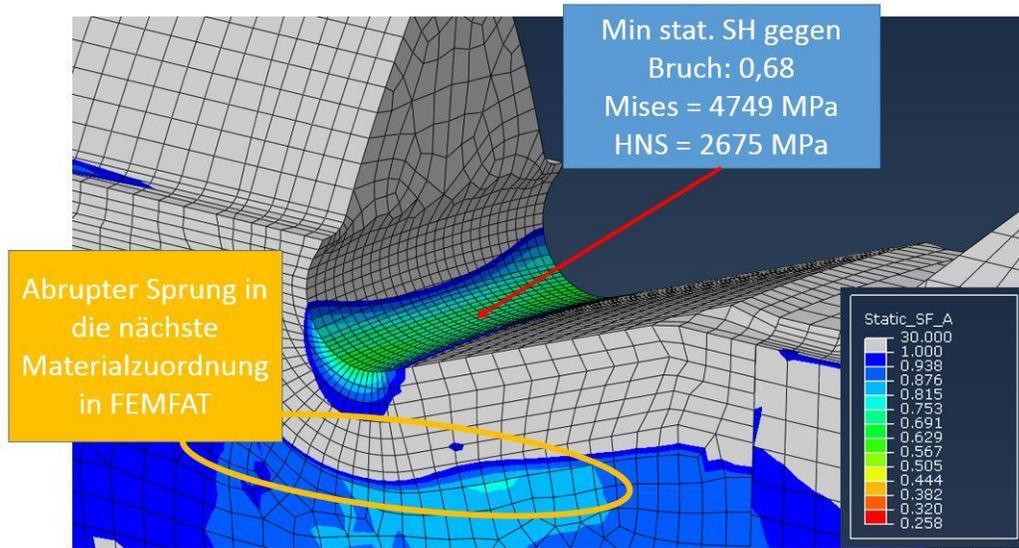


Abbildung 78: Errechnete Sicherheiten zu Nr. 156_146 Hexaeder

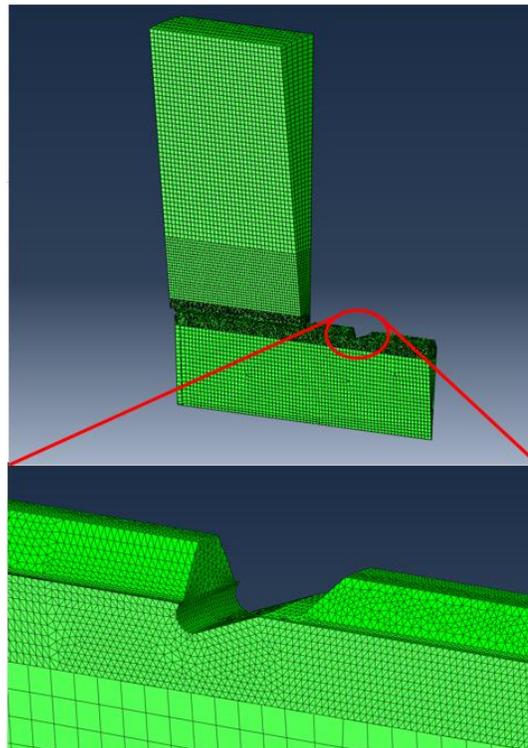


Abbildung 79: Modellaufbau zu Nr. 156_146 Tetraeder

11. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei zyklisch symmetrischen Kerben unter statischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge: Steckverzahnungen

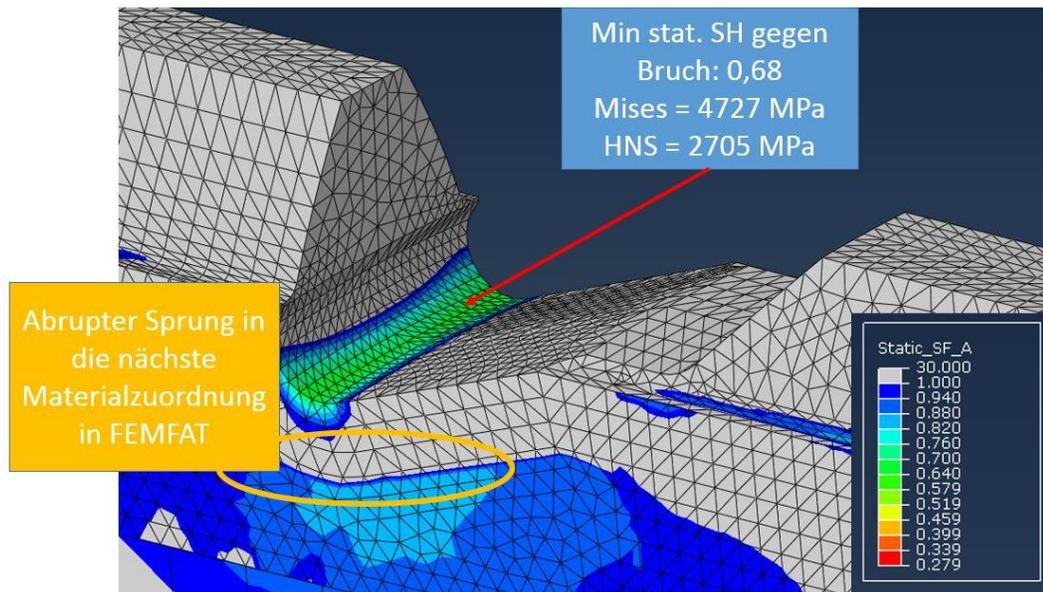


Abbildung 80: Errechnete Sicherheiten zu Nr. 156_146 Tetraeder

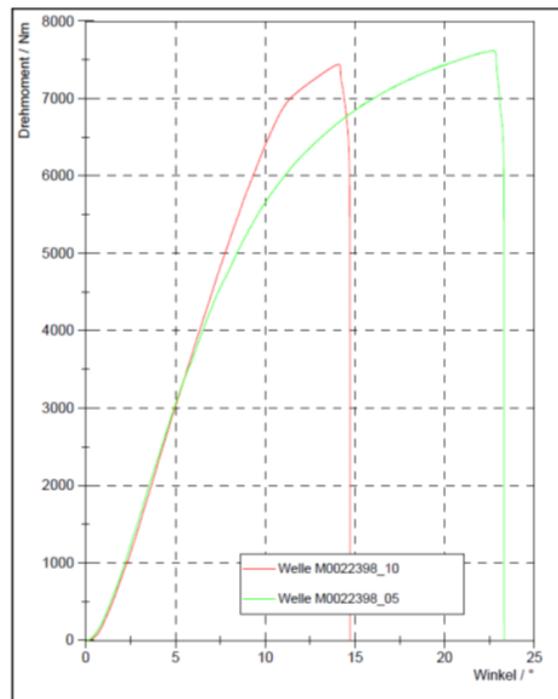


Abbildung 81: Moment / Verdrehwinkeldiagramm zu Nr. 156_146

11. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei zyklisch symmetrischen Kerben unter statischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge: Steckverzahnungen



Abbildung 82: Bruchbild zu Nr. 156_146

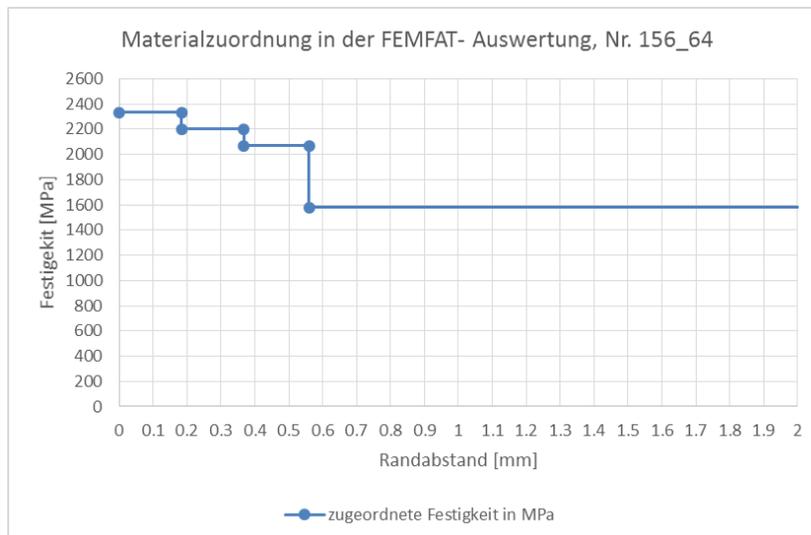


Abbildung 83: Materialzuordnung in FEMFAT, Nr. 156:146

Induktionsgehärtete Antriebswelle aus C45E

Datenbankeintrag Nummer 241_104

Material: C45E

Oberflächenbehandlung: Induktionsgehärtet

Anzahl an statisch erprobten Bauteilen: 2

11. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei zyklisch symmetrischen Kerben unter statischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge: Steckverzahnungen

Geometrische Kerbe an der Bruchstelle: Steckverzahnungsauslauf

Zähnezahl: 37

Fußkreisdurchmesser: 28,04 mm

Kopfkreisdurchmesser: 30 mm

Normalmodul: 0,79375 mm

Bohrungsdurchmesser an Bruchstelle: 0 mm

Kernhärte Ist: 215,5 HRC

Tabelle zur Umwertung der Kernhärte in Festigkeit nach DIN 18265: B3

Zugfestigkeit im Kern, umgewertet aus Kernhärte: 750 MPa

Oberflächenhärte Ist: 56,65 HRC

Zugfestigkeit der Oberfläche, umgewertet aus Oberflächenhärte in Anlehnung an DIN 18265: 2095 MPa

EHT 480 HV1: 3,3 mm

Durchschnittlich erreichtes Maximalmoment: 6173 Nm

Errechnete Sicherheit durch KISSsoft in Anlehnung an die FKM- Richtlinie, Kapitel 1, mit der um den Faktor 1,4 aufgewerteten Kernhärte als Berechnungseingangswert: 0,64

Errechnete Sicherheit durch FEMFAT, 3D FE- Modell, Elementtyp Tetraeder C3D10: 0,5

11. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei zyklisch symmetrischen Kerben unter statischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge: Steckverzahnungen

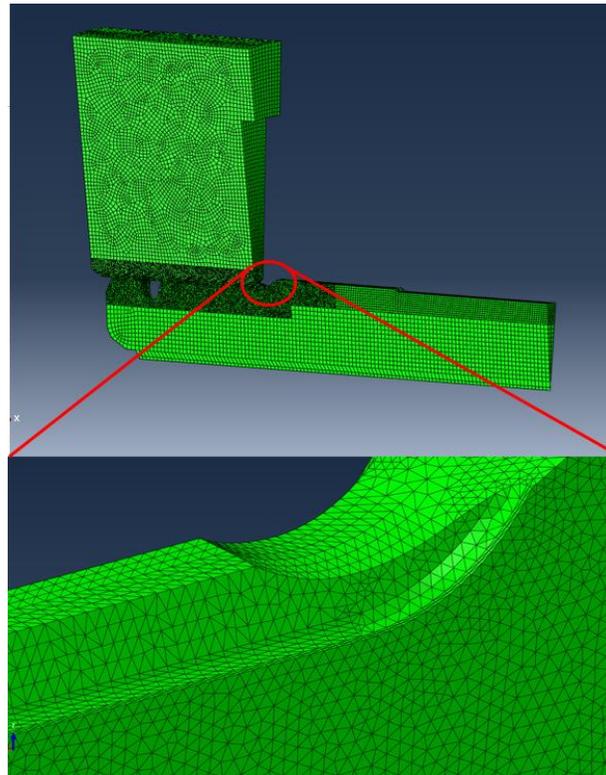


Abbildung 84: Modellaufbau zu Nr. 241_104

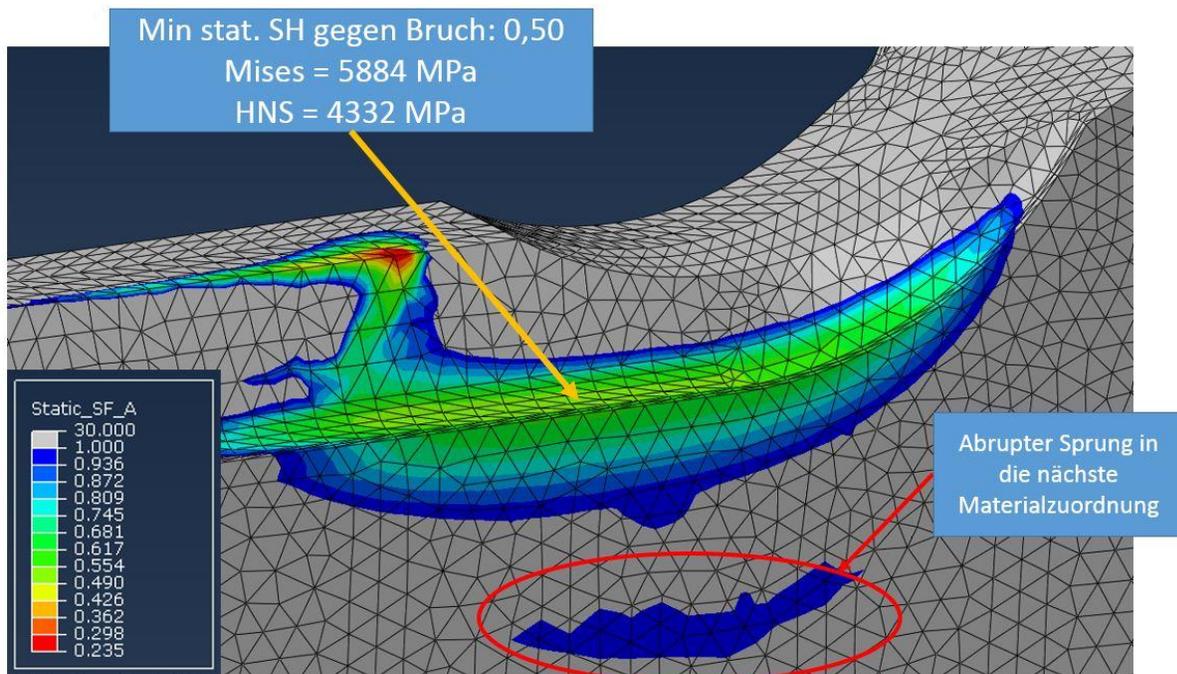


Abbildung 85: Errechnete Sicherheiten zu Nr. 241_104

11. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei zyklisch symmetrischen Kerben unter statischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge: Steckverzahnungen

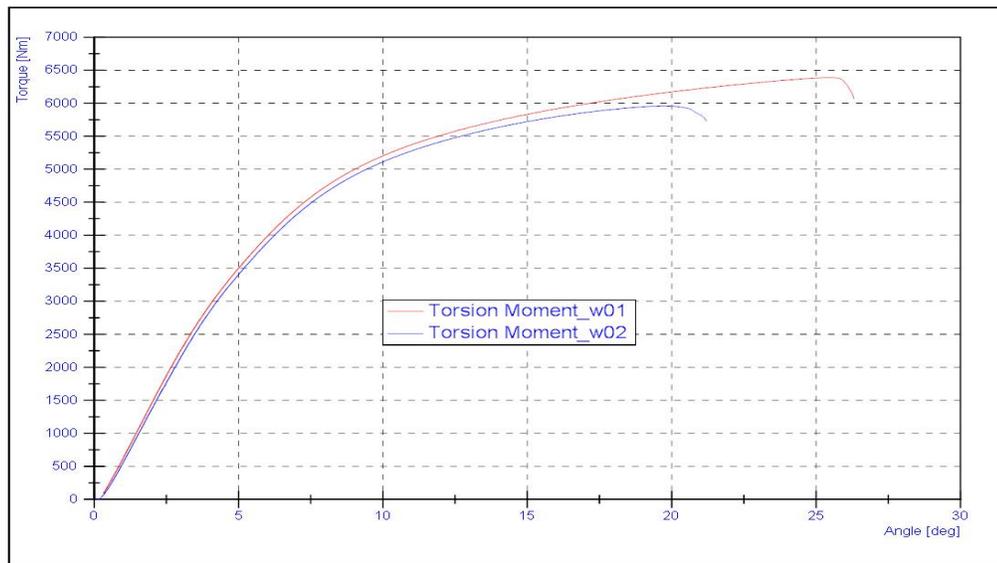


Abbildung 86: Moment / Verdrehwinkeldiagramm zu Nr. 241_104

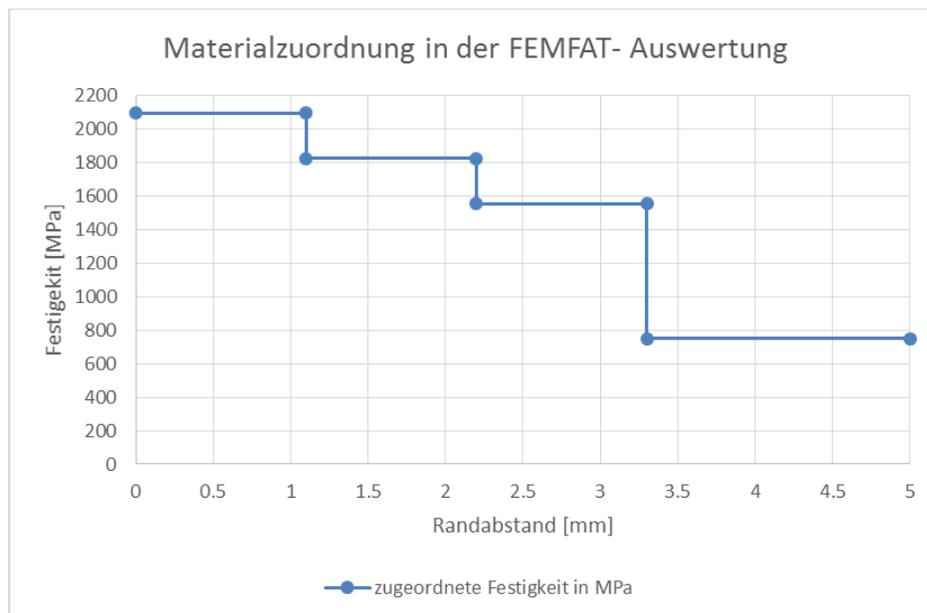


Abbildung 87: Materialzuordnung in FEMFAT, Nr. 241_104

Einsatzgehärtete Antriebswelle aus 20MnCr5

Datenbankeintrag Nummer 258_114

Material: 20MnCr5

11. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei zyklisch symmetrischen Kerben unter statischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge: Steckverzahnungen

Oberflächenbehandlung: Einsatzgehärtet

Anzahl an statisch erprobten Bauteilen: 3

Geometrische Kerbe an der Bruchstelle: Steckverzahnungsauslauf

Zähnezahl: 37

Fußkreisdurchmesser: 28,04 mm

Kopfkreisdurchmesser: 30 mm

Normalmodul: 0,79375 mm

Bohrungsdurchmesser an Bruchstelle: 0 mm

Kernhärte Ist: 246 HBW

Tabelle zur Umwertung der Kernhärte in Festigkeit nach DIN 18265: A1

Zugfestigkeit im Kern, umgewertet aus Kernhärte: 832 MPa

Oberflächenhärte Ist: 784 HV

Zugfestigkeit der Oberfläche, umgewertet aus Oberflächenhärte in Anlehnung an DIN 18265: 2699,5 MPa

CHD 550 HV1: 1,08 mm

Durchschnittlich erreichtes Maximalmoment: 4851 Nm

Errechnete Sicherheit durch KISSsoft in Anlehnung an die FKM- Richtlinie, Kapitel 1, mit der um den Faktor 1,3 aufgewerteten Kernhärte als Berechnungseingangswert: 0,92

Errechnete Sicherheit durch FEMFAT, 3D FE- Modell, Elementtyp Tetraeder C3D10: 0,81

11. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei zyklisch symmetrischen Kerben unter statischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge: Steckverzahnungen

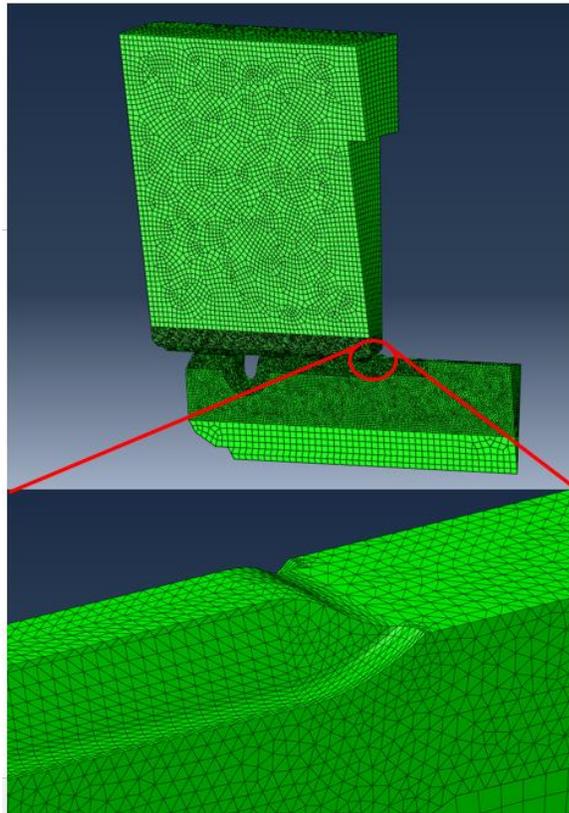


Abbildung 88: Modellaufbau zu Nr. 258_114

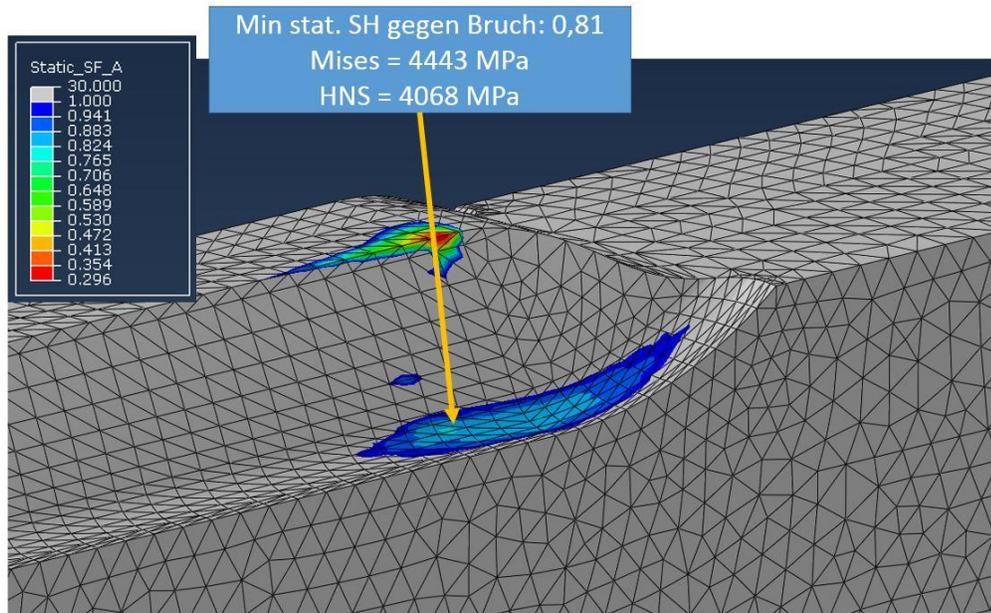


Abbildung 89: Errechnete Sicherheiten zu Nr. 258_114

11. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei zyklisch symmetrischen Kerben unter statischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge: Steckverzahnungen

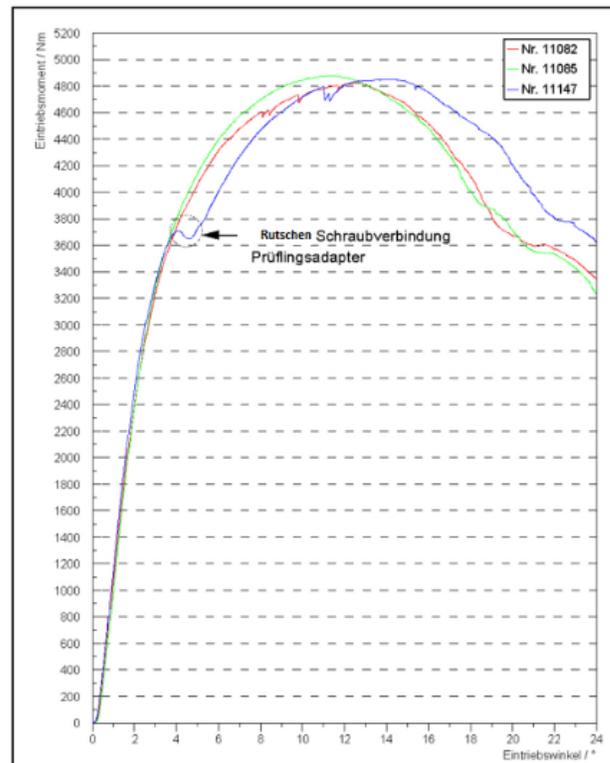


Abbildung 90: Moment / Verdrehwinkeldiagramm zu Nr. 258_114



Abbildung 91: Bruchbild zu Nr. 258_114

11. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei zyklisch symmetrischen Kerben unter statischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge: Steckverzahnungen



Abbildung 92: Bruchbild zu Nr. 258_114

Einsatzgehärtete Antriebswelle aus 38MnVS6

Datenbankeintrag Nummer 258_115

Material: 38MnVS6

Oberflächenbehandlung: Induktionsgehärtet

Anzahl an statisch erprobten Bauteilen: 2

Geometrische Kerbe an der Bruchstelle: Steckverzahnungsauslauf

Zähnezahl: 37

Fußkreisdurchmesser: 28,04 mm

Kopfkreisdurchmesser: 30 mm

Normalmodul: 0,79375

Bohrungsdurchmesser an Bruchstelle: 0 mm

Kernhärte Ist: 29,4 HRC

Tabelle zur Umwertung der Kernhärte in Festigkeit nach DIN 18265: B2

Zugfestigkeit im Kern, umgewertet aus Kernhärte: 916 MPa

Oberflächenhärte Ist: 623 HV

Zugfestigkeit der Oberfläche, umgewertet aus Oberflächenhärte in Anlehnung an DIN 18265: 2081 MPa

EHT 480 HV1: 2,51 mm

11. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei zyklisch symmetrischen Kerben unter statischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge: Steckverzahnungen

Durchschnittlich erreichtes Maximalmoment: 5000 Nm

Errechnete Sicherheit durch KISSsoft in Anlehnung an die FKM- Richtlinie, Kapitel 1, mit der um den Faktor 1,4 aufgewerteten Kernhärte als Berechnungseingangswert: 0,85

Errechnete Sicherheit durch FEMFAT, 3D FE- Modell, Elementtyp Tetraeder C3D10: 0,65

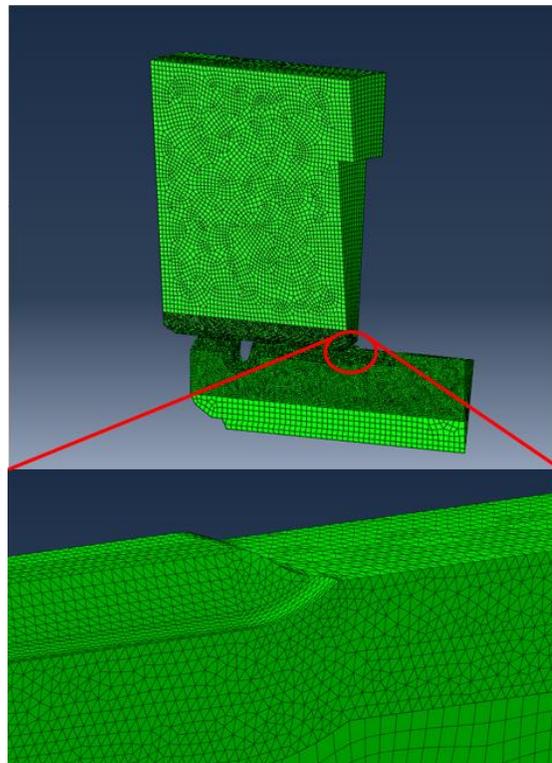


Abbildung 93: Modellaufbau zu Nr. 258_115

11. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei zyklisch symmetrischen Kerben unter statischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge: Steckverzahnungen

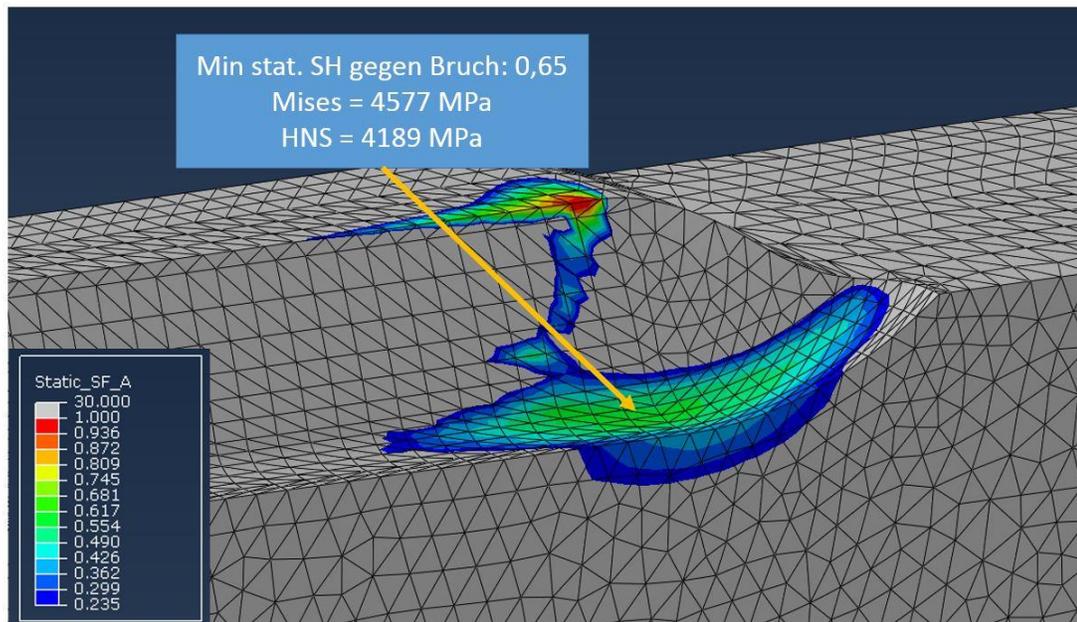


Abbildung 94: Errechnete Sicherheiten zu Nr. 258_115, farbig: errechnete Sicherheit kleiner 1



Abbildung 95: Bruchbild zu Nr. 258_115

11. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei zyklisch symmetrischen Kerben unter statischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge: Steckverzahnungen

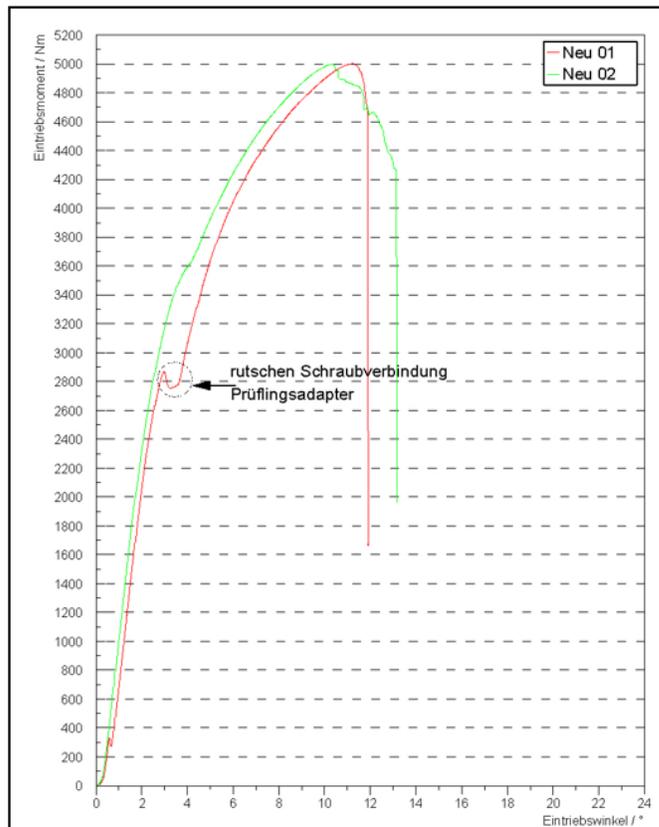


Abbildung 96: Moment / Verdrehwinkeldiagramm zu Nr. 258_115

Induktionsgehärtete Antriebswelle aus 42CrMo4

Datenbankeintrag Nummer 268_107

Material: 42CrMo4

Oberflächenbehandlung: Induktionsgehärtet

Anzahl an statisch erprobten Bauteilen: 1

Geometrische Kerbe an der Bruchstelle: Steckverzahnungsauslauf

Zähnezahl: 24

Fußkreisdurchmesser: 24,2 mm

Kopfkreisdurchmesser: 26,45 mm

Normalmodul: 1,0583

Bohrungsdurchmesser an Bruchstelle: 0 mm

11. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei zyklisch symmetrischen Kerben unter statischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge: Steckverzahnungen

Kernhärte Ist: 299,8 HV10

Tabelle zur Umwertung der Kernhärte in Festigkeit nach DIN 18265: B2

Zugfestigkeit im Kern, umgewertet aus Kernhärte: 939 MPa

Oberflächenhärte Ist: 55,67 HRC

Zugfestigkeit der Oberfläche, umgewertet aus Oberflächenhärte in Anlehnung an DIN 18265: 2028 MPa

EHT 441 HV1: 5,55 mm

Durchschnittlich erreichtes Maximalmoment: 4698 Nm

Errechnete Sicherheit durch KISSsoft in Anlehnung an die FKM- Richtlinie, Kapitel 1, mit der um den Faktor 1,4 aufgewerteten Kernhärte als Berechnungseingangswert: 0,59

Errechnete Sicherheit durch FEMFAT, 3D FE- Modell, Elementtyp Hexaeder C3D8I: 0,46

Errechnete Sicherheit durch FEMFAT, 3D FE- Modell, Elementtyp Tetraeder C3D10: 0,44

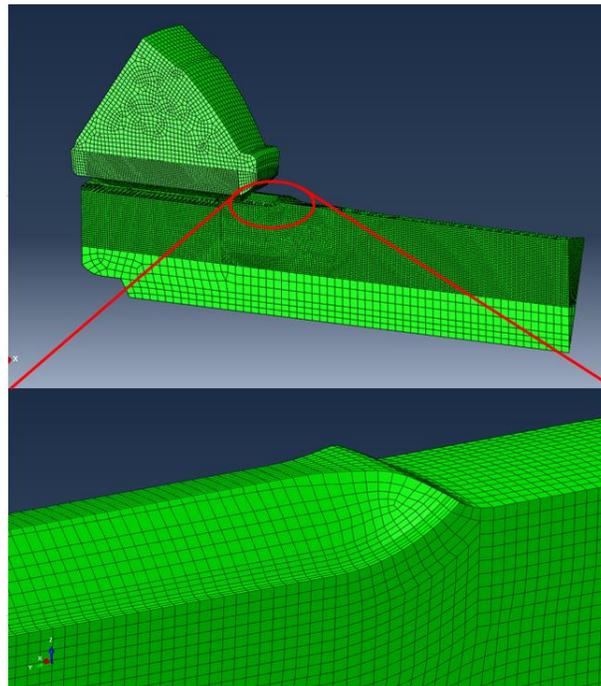


Abbildung 97: Modellaufbau zu Nr. 268_107 Hexaeder

11. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei zyklisch symmetrischen Kerben unter statischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge: Steckverzahnungen

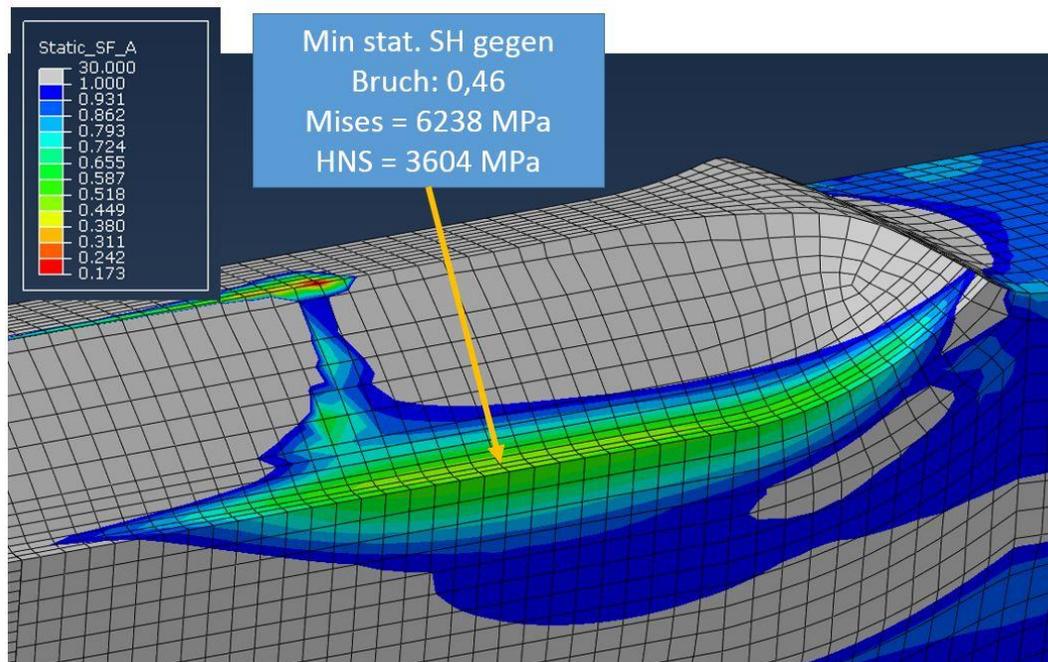


Abbildung 98: Errechnete Sicherheiten zu Nr. 268_107 Hexaeder

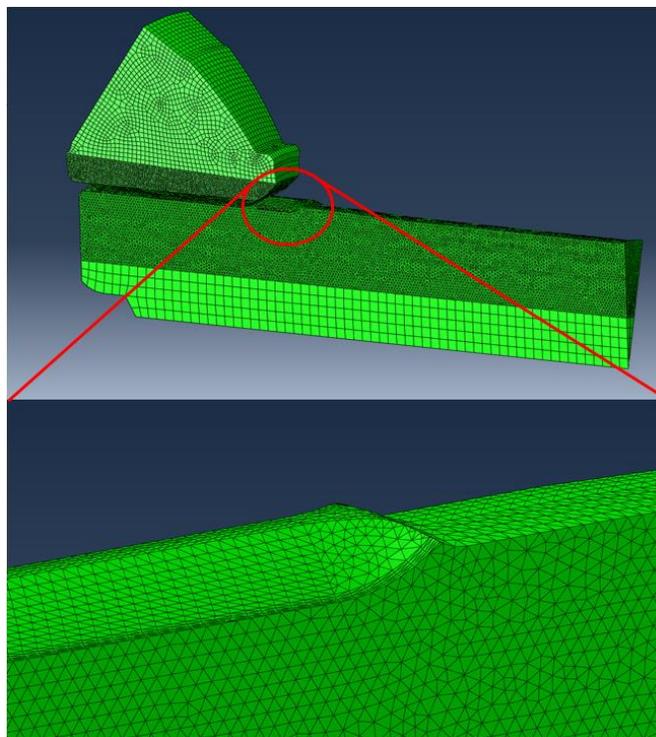


Abbildung 99: Modellaufbau zu Nr. 268_107 Tetraeder

11. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei zyklisch symmetrischen Kerben unter statischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge: Steckverzahnungen

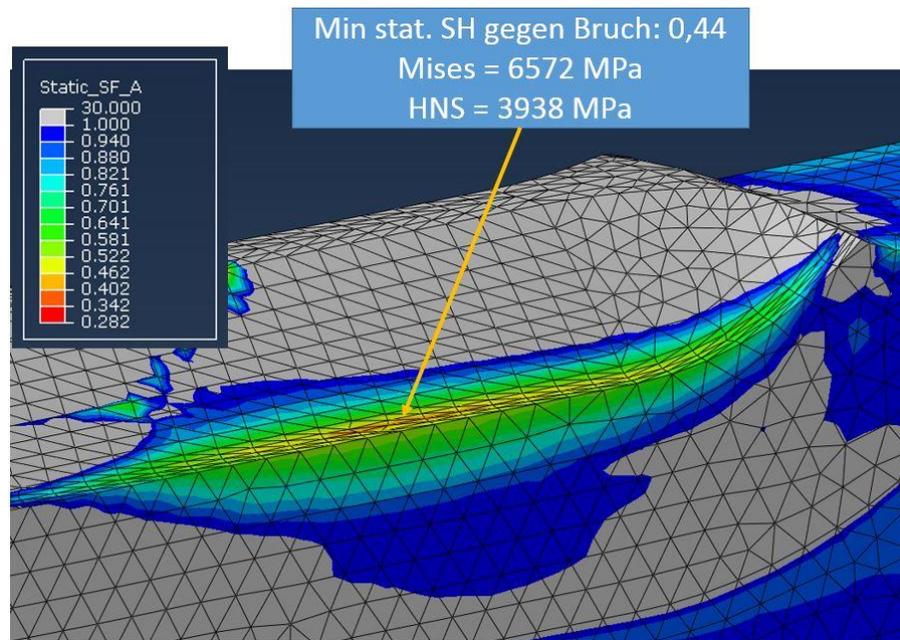


Abbildung 100: Errechnete Sicherheiten zu Nr. 268_107 Tetraeder

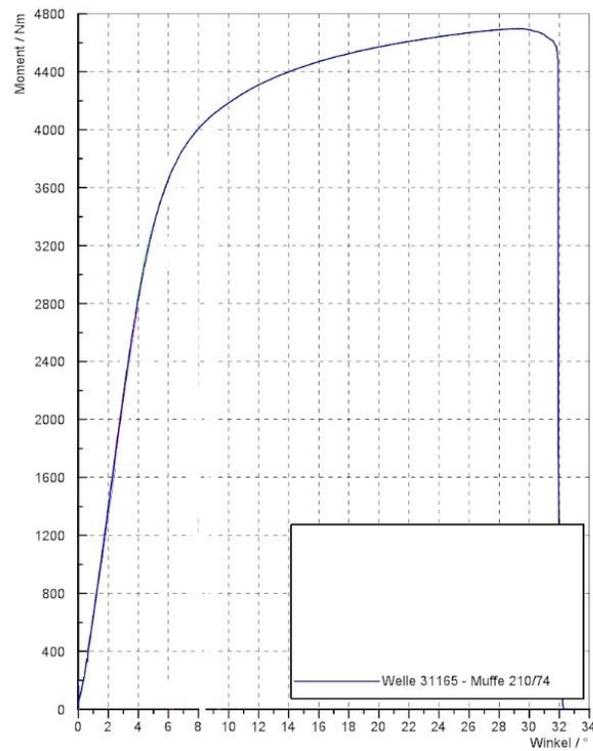


Abbildung 101: Moment / Verdrehwinkeldiagramm zu Nr. 268_107

11. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei zyklisch symmetrischen Kerben unter statischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge: Steckverzahnungen



Abbildung 102: Bruchbild zu Nr. 268_107

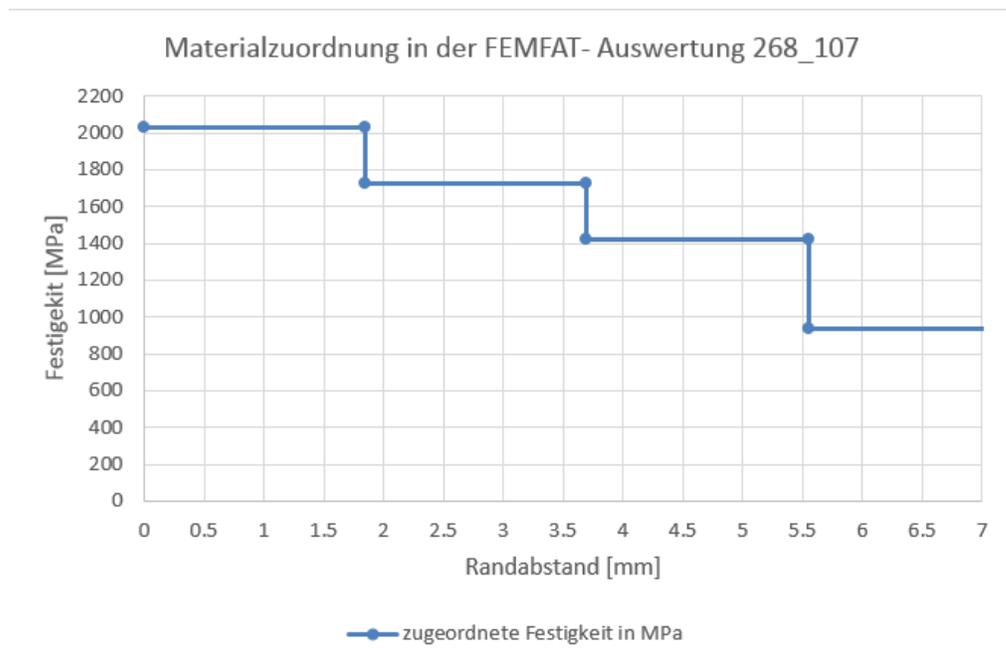


Abbildung 103: Materialzuordnung in FEMFAT, Nr. 268_107

Induktionsgehärtete Flanschswelle aus 42CrS4

Datenbankeintrag Nummer 363_108

Material: 42CrS4

11. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei zyklisch symmetrischen Kerben unter statischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge: Steckverzahnungen

Oberflächenbehandlung: Induktionsgehärtet

Anzahl an statisch erprobten Bauteilen: 2

Geometrische Kerbe an der Bruchstelle: Steckverzahnungsauslauf

Zähnezahl: 37

Fußkreisdurchmesser: 28,04 mm

Kopfkreisdurchmesser: 30 mm

Normalmodul: 0,79375 mm

Bohrungsdurchmesser an Bruchstelle: 0 mm

Kernhärte Ist: 280,2 HBW

Tabelle zur Umwertung der Kernhärte in Festigkeit nach DIN 18265: B2

Zugfestigkeit im Kern, umgewertet aus Kernhärte: 890 MPa

Oberflächenhärte Ist: 663 HV1

Zugfestigkeit der Oberfläche, umgewertet aus Oberflächenhärte in Anlehnung an DIN 18265: 2222 MPa

EHT 480 HV1: 1,92 mm

Durchschnittlich erreichtes Maximalmoment: 5078 Nm

Errechnete Sicherheit durch KISSsoft in Anlehnung an die FKM- Richtlinie, Kapitel 1, mit der um den Faktor 1,4 aufgewerteten Kernhärte als Berechnungseingangswert: 0,87

Errechnete Sicherheit durch FEMFAT, 3D FE- Modell, Elementtyp Tetraeder C3D10: 0,64

11. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei zyklisch symmetrischen Kerben unter statischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge: Steckverzahnungen

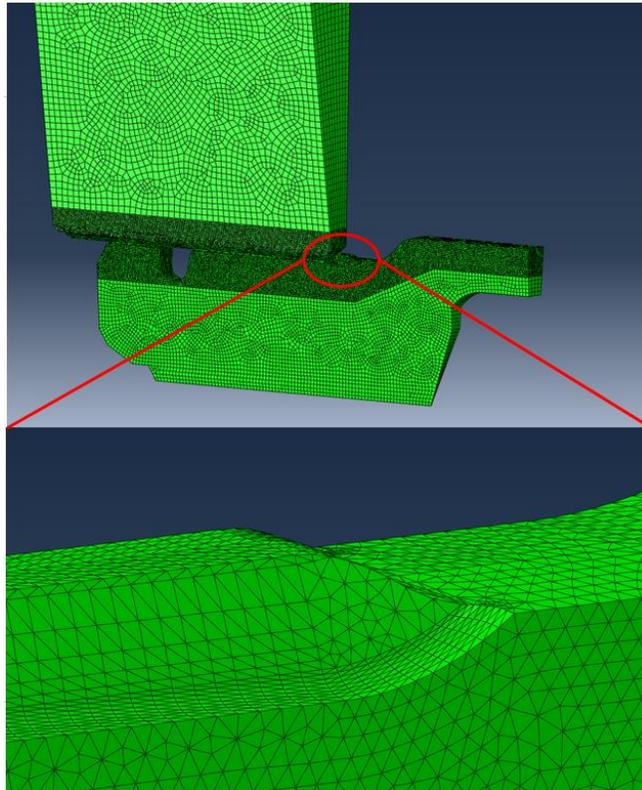


Abbildung 104: Modellaufbau zu Nr. 363_108

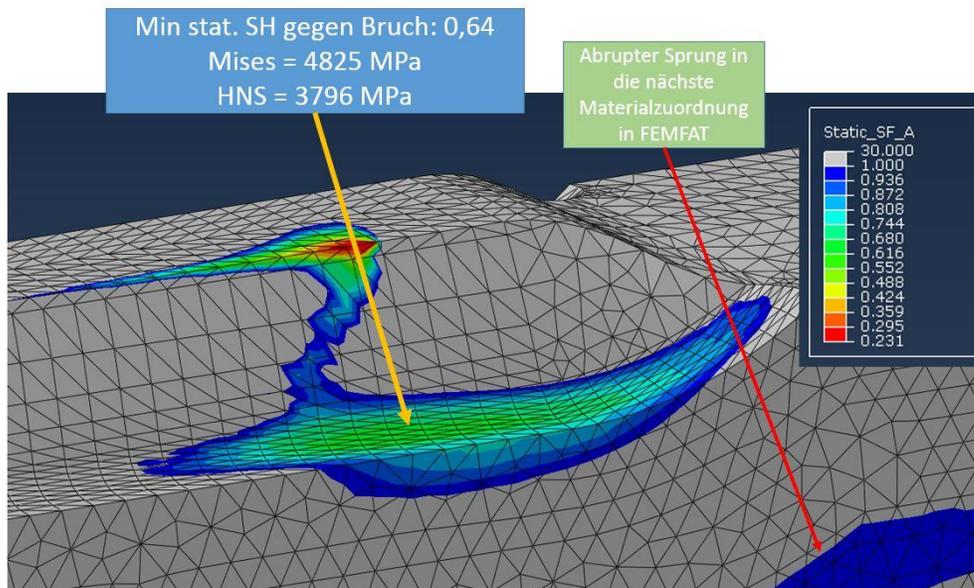


Abbildung 105: Errechnete Sicherheiten zu Nr. 363_108

11. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei zyklisch symmetrischen Kerben unter statischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge: Steckverzahnungen

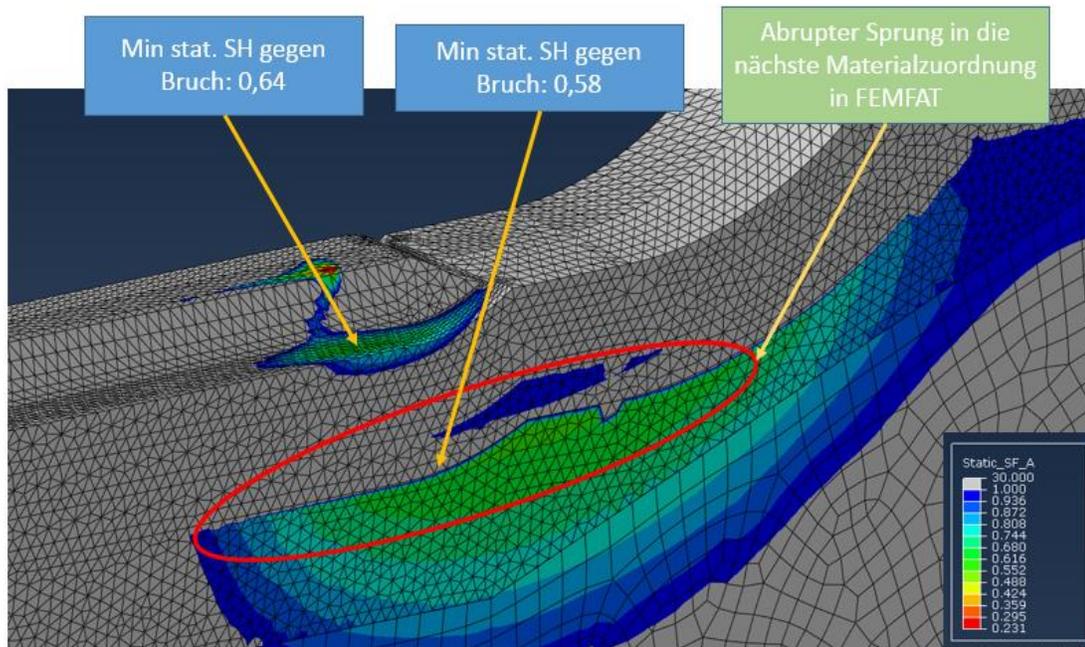


Abbildung 106: Errechnete Sicherheiten zu Nr. 363_108



Abbildung 107: Bruchbild zu Nr. 363_108

11. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei zyklisch symmetrischen Kerben unter statischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge: Steckverzahnungen



Abbildung 108: Bruchbild zu Nr. 363_108

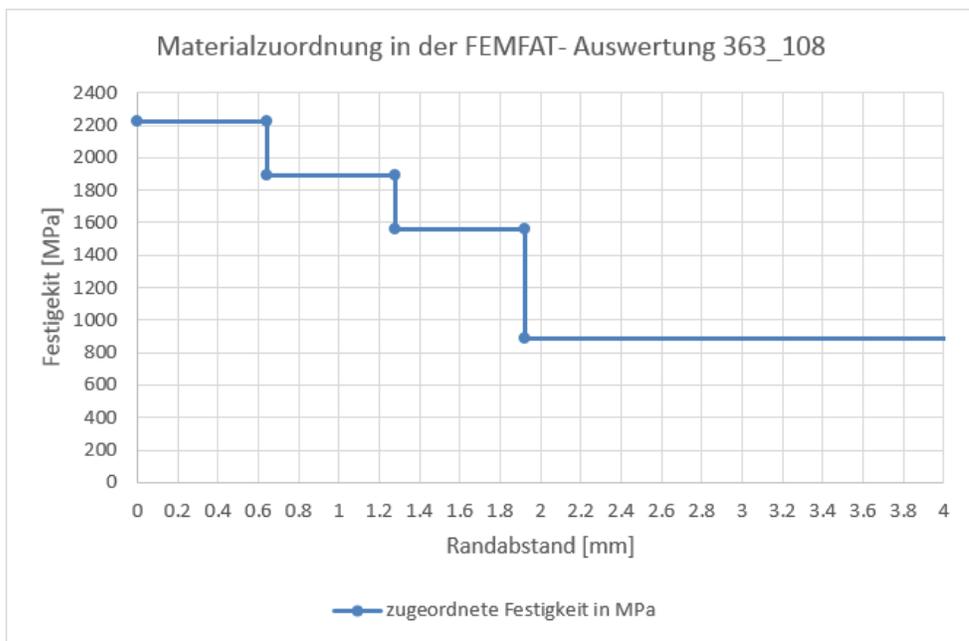


Abbildung 109: Materialzuordnung in FEMFAT, Nr. 363_108

11. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei zyklisch symmetrischen Kerben unter statischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge: Steckverzahnungen



Abbildung 110: Bruchbild zu Nr. 363_108

Ungehärtete Flanschswelle aus 41CrS4

Datenbankeintrag Nummer 463_149

Material: 41CrS4

Oberflächenbehandlung: nicht gehärtet

Anzahl an statisch erprobten Bauteilen: 3

Geometrische Kerbe an der Bruchstelle: Steckverzahnungsauslauf

Zähnezahl: 40

Fußkreisdurchmesser: 30,75 mm

Kopfkreisdurchmesser: 32,9 mm

Normalmodul: 0,794 mm

Bohrungsdurchmesser an Bruchstelle: ~12 mm

Kernhärte Ist: 35,93 HRC

Tabelle zur Umwertung der Kernhärte in Festigkeit nach DIN 18265: B2

Zugfestigkeit im Kern, umgewertet aus Kernhärte: 1083 MPa

Oberflächenhärte Ist: gleich Kernhärte (nicht randschichtverfestigt), ~36 HRC

Zugfestigkeit der Oberfläche, umgewertet aus Oberflächenhärte in Anlehnung an DIN 18265: 1083 MPa

11. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei zyklisch symmetrischen Kerben unter statischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge: Steckverzahnungen

Durchschnittlich erreichtes Maximalmoment: 5625 Nm

Errechnete Sicherheit durch KISSsoft in Anlehnung an die FKM- Richtlinie, Kapitel 1, mit der Kernhärte als Berechnungseingangswert: 0,79

Errechnete Sicherheit durch FEMFAT, 3D FE- Modell, Elementtyp Tetraeder C3D10: 0,53

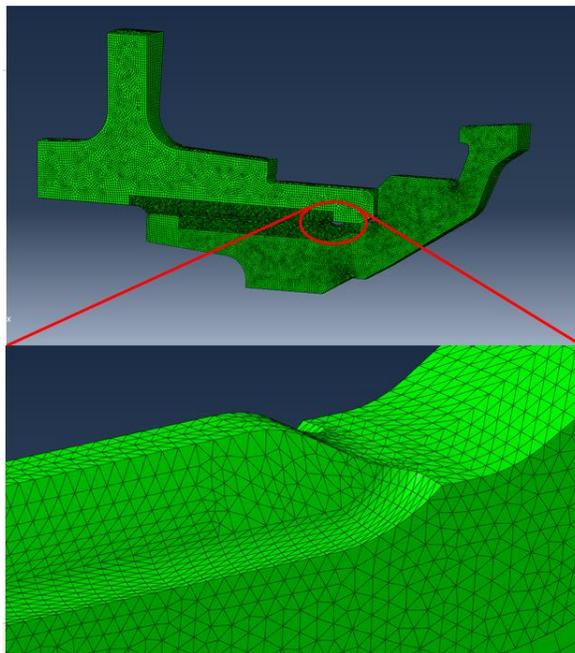


Abbildung 111: Modellaufbau zu Nr. 463_149

11. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei zyklisch symmetrischen Kerben unter statischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge: Steckverzahnungen

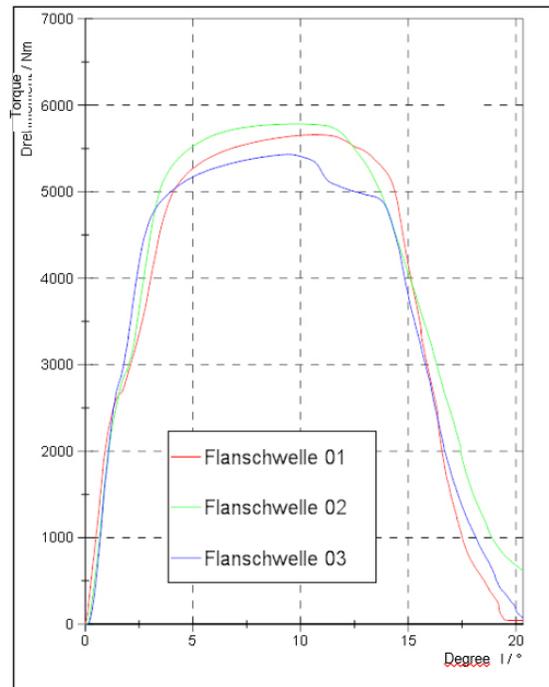


Abbildung 112: Moment / Verdrehwinkeldiagramm zu Nr. 463_149

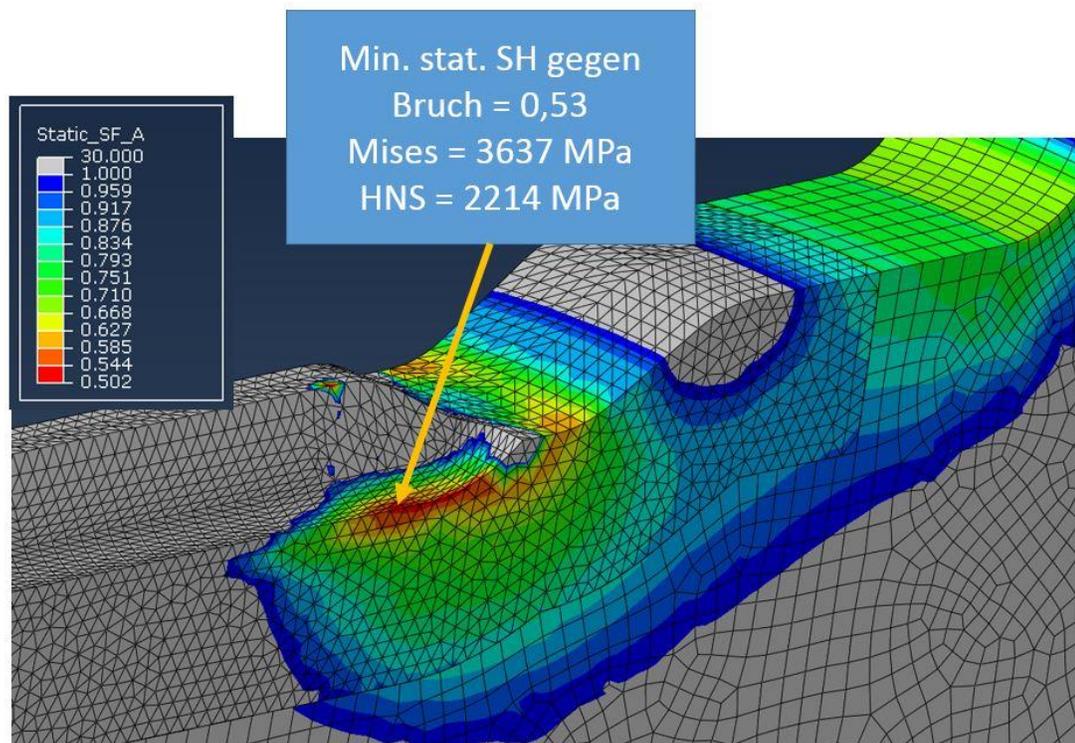


Abbildung 113: Errechnete Sicherheiten zu Nr. 463_149

11. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei zyklisch symmetrischen Kerben unter statischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge: Steckverzahnungen



Abbildung 114: Bruchbild zu Nr. 463_149



Abbildung 115: Bruchbild zu Nr. 463_149

Einsatzgehärtete Antriebswelle aus 20MnCr5

Datenbankeintrag Nummer 145

Material: 20MnCr5

Oberflächenbehandlung: Einsatzgehärtet

11. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei zyklisch symmetrischen Kerben unter statischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge: Steckverzahnungen

Anzahl an statisch erprobten Bauteilen: 2

Geometrische Kerbe an der Bruchstelle: Steckverzahnungsauslauf

Zähnezahl: 29

Normalmodul: 1,25 mm

Bohrungsdurchmesser an Bruchstelle: ~12 mm

Zugfestigkeit im Kern, umgewertet aus Kernhärte: 1300 MPa

Oberflächenhärte Ist: 680 HV

Zugfestigkeit der Oberfläche, umgewertet aus Oberflächenhärte in Anlehnung an DIN 18265: 2287 MPa

CHD 550 HV1: 0,93 mm

Durchschnittlich erreichtes Maximalmoment: 9053 Nm

Errechnete Sicherheit durch KISSsoft in Anlehnung an die FKM- Richtlinie, Kapitel 1, mit der um den Faktor 1,3 aufgewerteten Kernhärte als Berechnungseingangswert: 1,18

Errechnete Sicherheit durch FEMFAT, 3D FE- Modell, Elementtyp Hexaeder C3D8I: 0,72

Errechnete Sicherheit durch FEMFAT, 3D FE- Modell, Elementtyp Tetraeder C3D10: 0,64

11. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei zyklisch symmetrischen Kerben unter statischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge: Steckverzahnungen

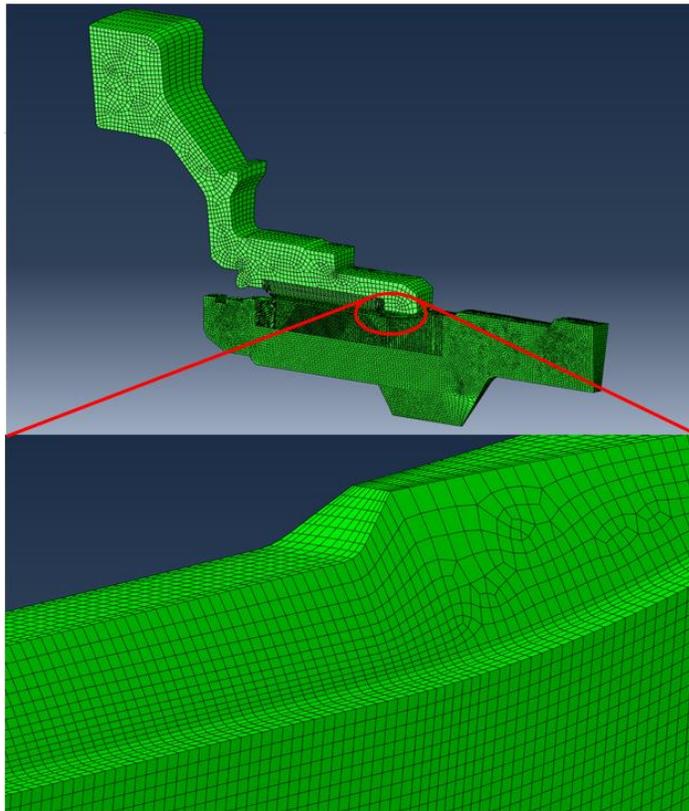


Abbildung 116: Modellaufbau zu Nr. 145 Hexaeder

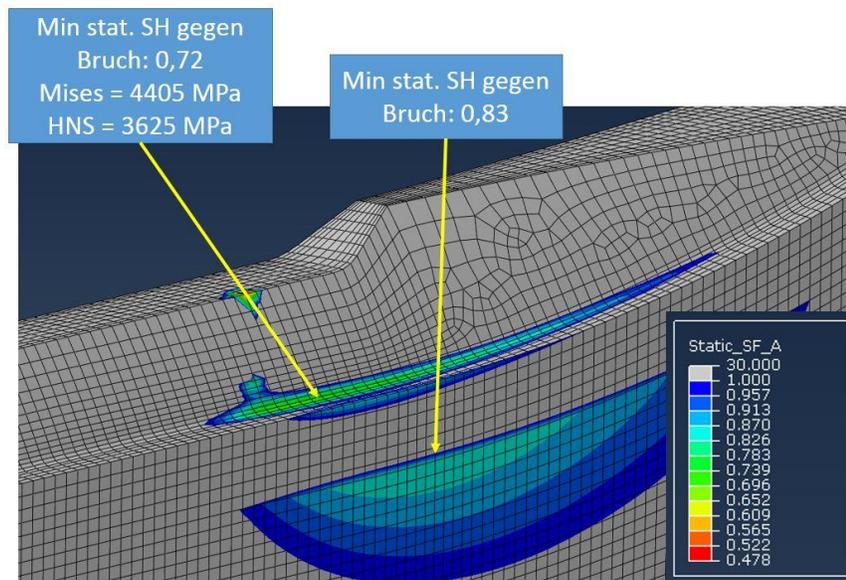


Abbildung 117: Errechnete Sicherheiten zu Nr. 145 Hexaeder

11. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei zyklisch symmetrischen Kerben unter statischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge: Steckverzahnungen

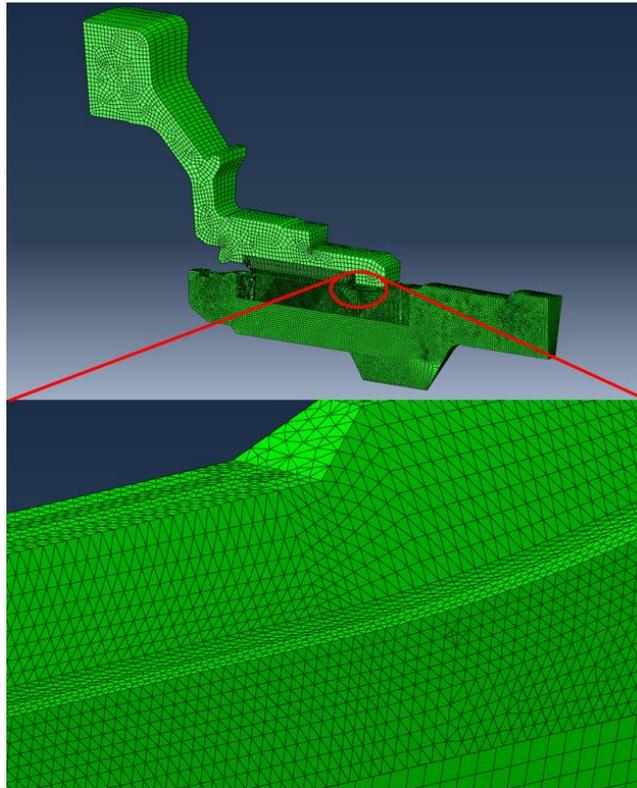


Abbildung 118: Modellaufbau zu Nr. 145 Tetraeder

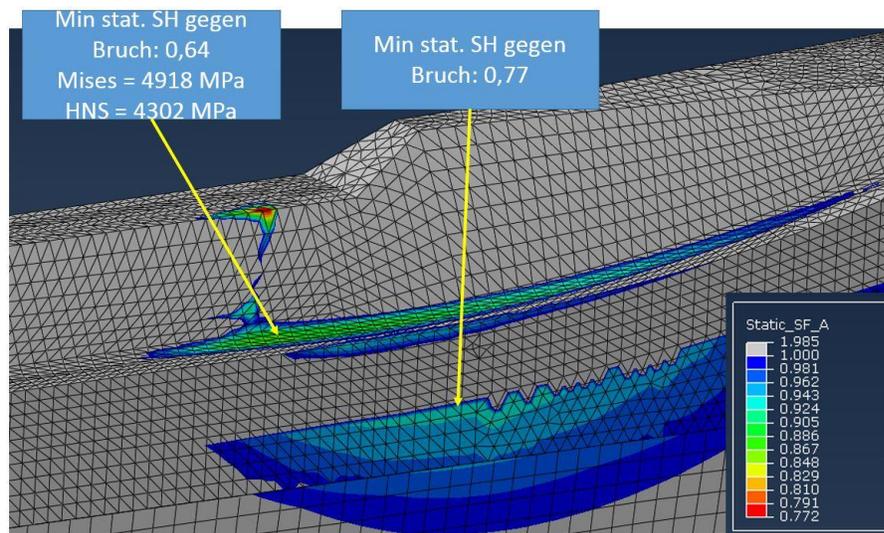


Abbildung 119: Errechnete Sicherheiten zu Nr. 145 Tetraeder

11. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei zyklisch symmetrischen Kerben unter statischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge: Steckverzahnungen

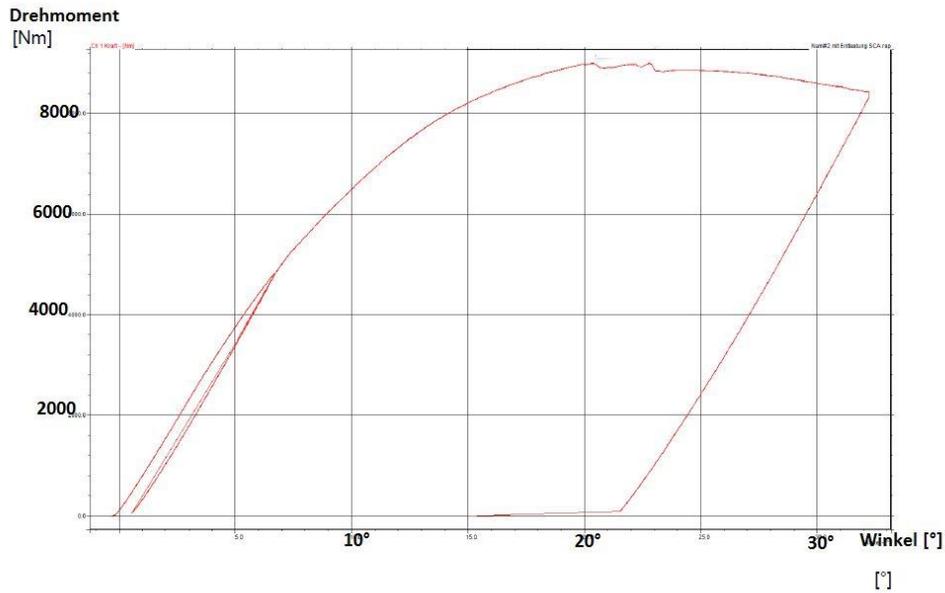


Abbildung 120: Moment / Verdrehwinkeldiagramm zu Nr. 145

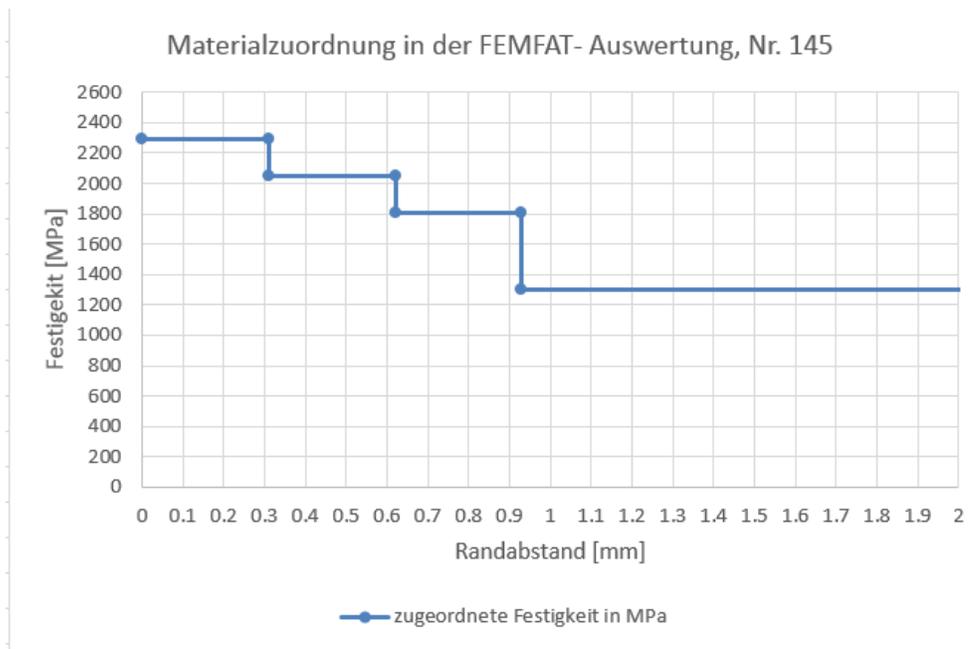


Abbildung 121: Materialzuordnung in FEMFAT, Nr. 145

11. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei zyklisch symmetrischen Kerben unter statischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge: Steckverzahnungen



Abbildung 122: Bruchbild zu Nr. 145

Diskussion der Ergebnisse

Auffallend bei der Auswertung der Erprobungen an den Prüfständen war, dass diese Art von Kerbstelle bei statischen Erprobungen gegen Gewaltbruch weniger kritisch zu sein scheint als unter dynamischer Belastung und wiederum bei Belastungen im Kurzzeitfestigkeitsbereich weniger kritisch als bei einer Belastung, die mehrere Hunderttausend Lastwechsel ertragen werden konnte. Grundsätzlich konnte also festgestellt werden: Je niedriger die Belastung und je höher dadurch die Anzahl an Lastwechseln bis Bruch, desto eher trat ein Bruch im Auslauf der Steckverzahnung ein. Je höher die Belastung, desto eher verlagerte sich die Bruchstelle zu anderen Kerben.

Bei der Nachrechnung von Bauteilen mittels 3D- FE- Modell, deren Bruchstelle die Steckverzahnung bildete, haben sich ein paar Phänomene gezeigt, die durchgehend in sämtlichen Rechnungen festzustellen waren und daher im Folgenden diskutiert werden sollen. Repräsentativ werden diese Phänomene an der FE Rechnung zu Datenbankeintrag Nummer 268_107 gezeigt. Genauere Angaben zur Rechnung können im Kapitel der Einzelergebnisse unter diesem Eintrag gefunden werden.

- 1.) Hohe Spannungsüberhöhung im Verzahnungsauslauf, direkt nach Eingriffsende der Gegenverzahnung

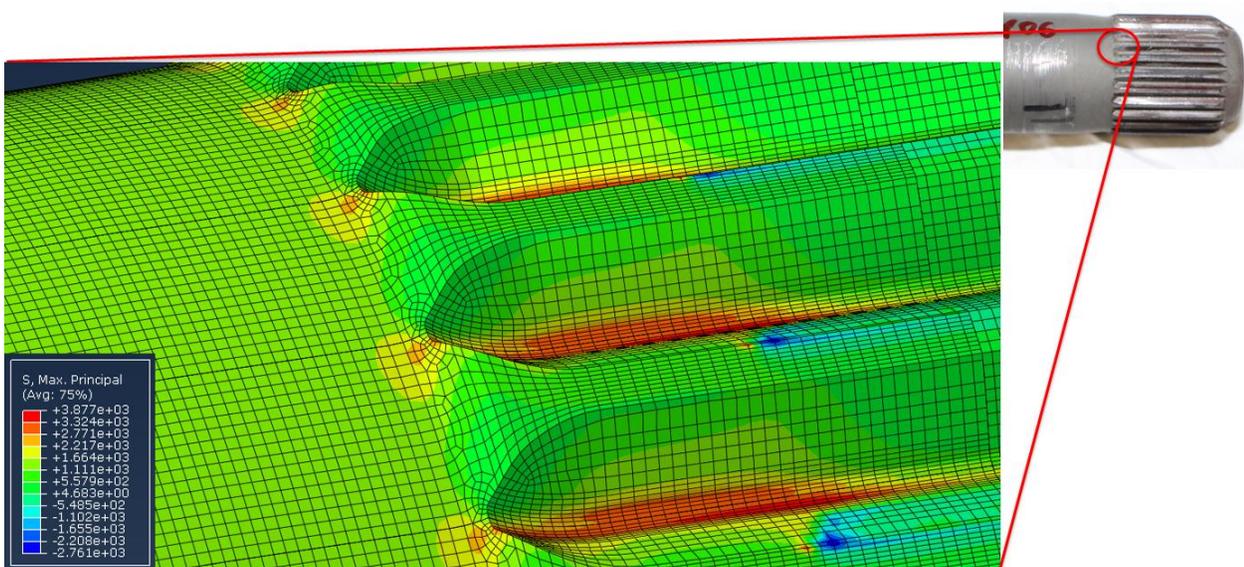


Abbildung 123: Steckverzahnung FE

Die Abbildung zeigt das typische Ergebnis einer Festigkeitsberechnung von Steckverzahnungen mittels FE-Methode. Die Gegenverzahnung des im Versuch verwendeten Adapters wurde hier zugunsten der Übersichtlichkeit ausgeblendet. Die Farben sollen die örtlichen Hauptnormalspannungen repräsentieren,

11. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei zyklisch symmetrischen Kerben unter statischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge: Steckverzahnungen

gewählt wurde ein Regenbogenspektrum von Rot bis Blau (Rot, Gelb, Grün für positive Spannungen, Türkis und Blau für negative Werte). In jeder der Nachrechnungen ist eine hohe Spannungskonzentration im Zahnfuß feststellbar, wenige zehntel Millimeter in Axialrichtung nach Eingriffsende der Gegenverzahnung (welche beim Eingriffsende den blauen Fleck auf der Zahnkante hinterlässt und deren Kante sich damit erahnen lässt. Darauf wird später noch weiter eingegangen). Das Maximum dieser Spannungskonzentration liegt dabei nicht exakt in der Mitte des Zahnfußes, sondern leicht in Richtung der Zugflanke verschoben.

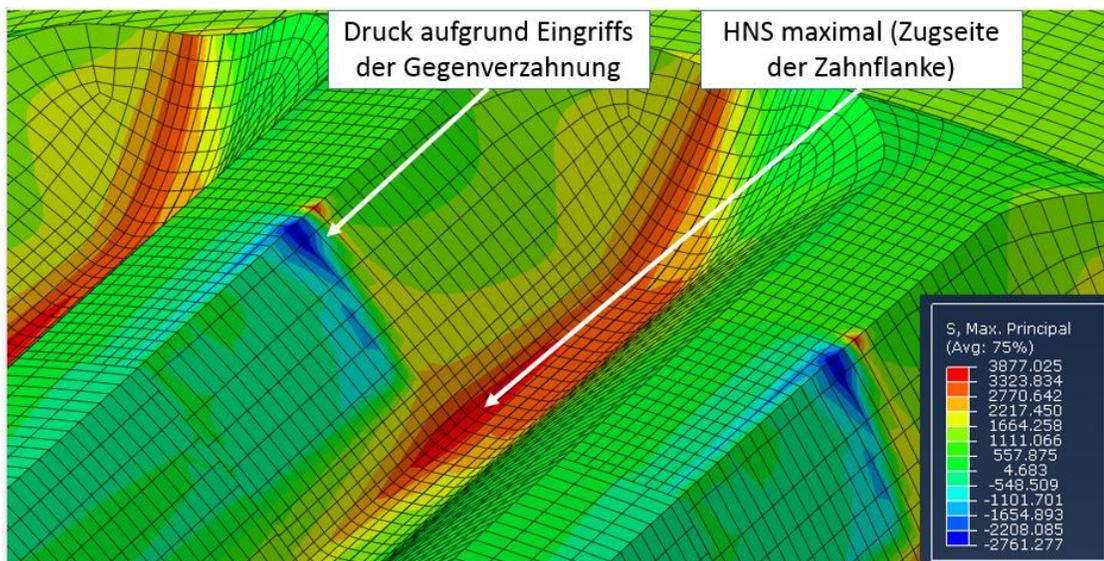


Abbildung 124: Hauptnormalspannungen im Steckverzahnungsauslauf

Diese Spannungsüberhöhung blieb in allen Fällen stark lokal im Zahnfuß beschränkt. Um den Maximalwert bildet sich ein Bereich von etwa 2-3 mm Länge (axial), etwa 1mm Breite und 0,05mm bis 0,1mm Tiefe, innerhalb dessen die Spannung auf 85% ihres maximalen Werts absinkt. Siehe hierzu die folgende Abbildung.

11. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei zyklisch symmetrischen Kerben unter statischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge: Steckverzahnungen

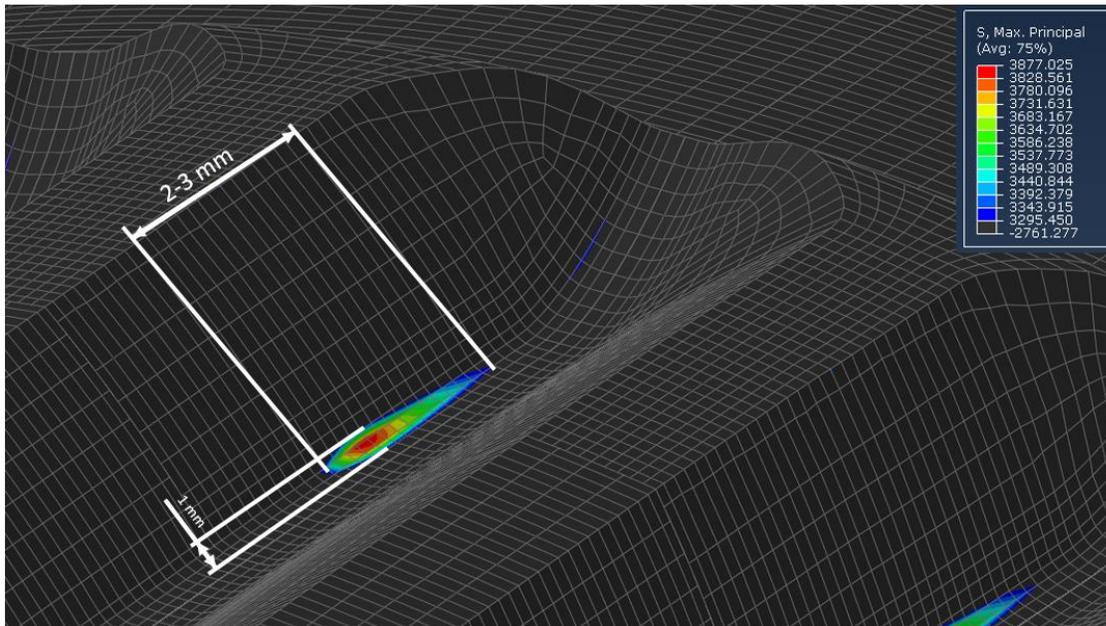


Abbildung 125: Spannungsüberhöhung: Höhere Spannungen als 85% der Maximalspannung farbig

Im Laufe der Nachrechnungen stellte sich heraus, dass diese Flecke der hohen Spannungskonzentration, die sich vor allem bei Rechnung gegen statischen Gewaltbruch aufgrund der höheren Belastung ausprägen und zu Hauptnormalspannungen im Bereich von über 4000 MPa führen, weniger kritisch sind, als sich durch die linear-elastische Rechnung ergibt.

Eindrucksvoll lässt sich das an einem Beispiel zeigen, in dem bei statischer Erprobung das Bauteil schlussendlich nicht im Verzahnungsauslauf, sondern in einem kurz darauf folgenden Einstich gebrochen ist, obwohl die errechnete Sicherheit durch 3D FE-Modell und FEMFAT Break-Auswertung im diskutierten Spannungsmaximum des Verzahnungsauslaufs liegt.

In der Abbildung ist das FE-Modell der Nachrechnung von Datenbankeintrag Nummer 118_148 nach erfolgter FEMFAT Break-Auswertung dargestellt. Bereiche mit errechneten statischen Sicherheiten kleiner 1 gegen Bruch sind farbig hervorgehoben. Im Bild rechts daneben ist der tatsächliche Bruch in der Erprobung dargestellt, dieser erfolgte im Einstich nach der Verzahnung, in der die errechnete Sicherheit höher liegt. Interessant ist, dass die errechnete statische Sicherheit im Einstich, dem tatsächlichen Bruchbereich, bei etwa 0,9 liegt, was grundsätzlich aber wieder eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Versuch und Berechnung im tatsächlich stattgefundenen Bruchbereich bedeutet.

11. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei zyklisch symmetrischen Kerben unter statischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge: Steckverzahnungen

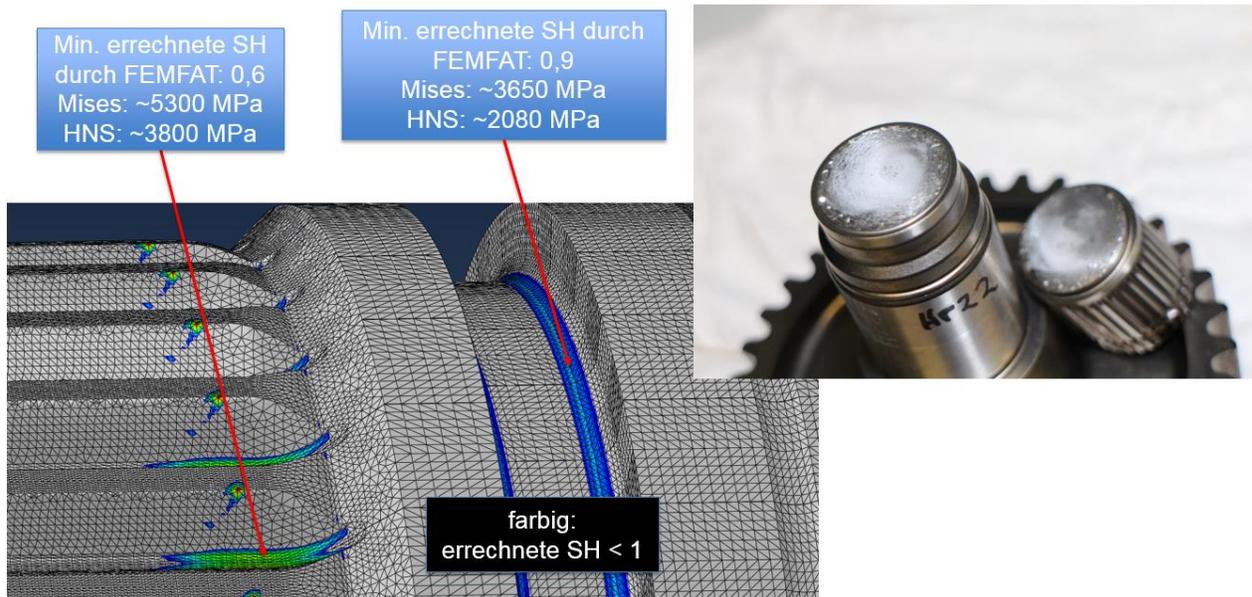


Abbildung 126: Errechnete Sicherheiten

Durch die hohen im 3D- FE- Modell entstehenden Spannungen im Zahnfuß gestaltet sich auch die Festigkeitsbewertung gegen plastische Verformung als schwierig. Hierfür soll die nächste Abbildung der bereits oben behandelten Nachrechnung (Datenbank Nummer 268_107) betrachtet werden.

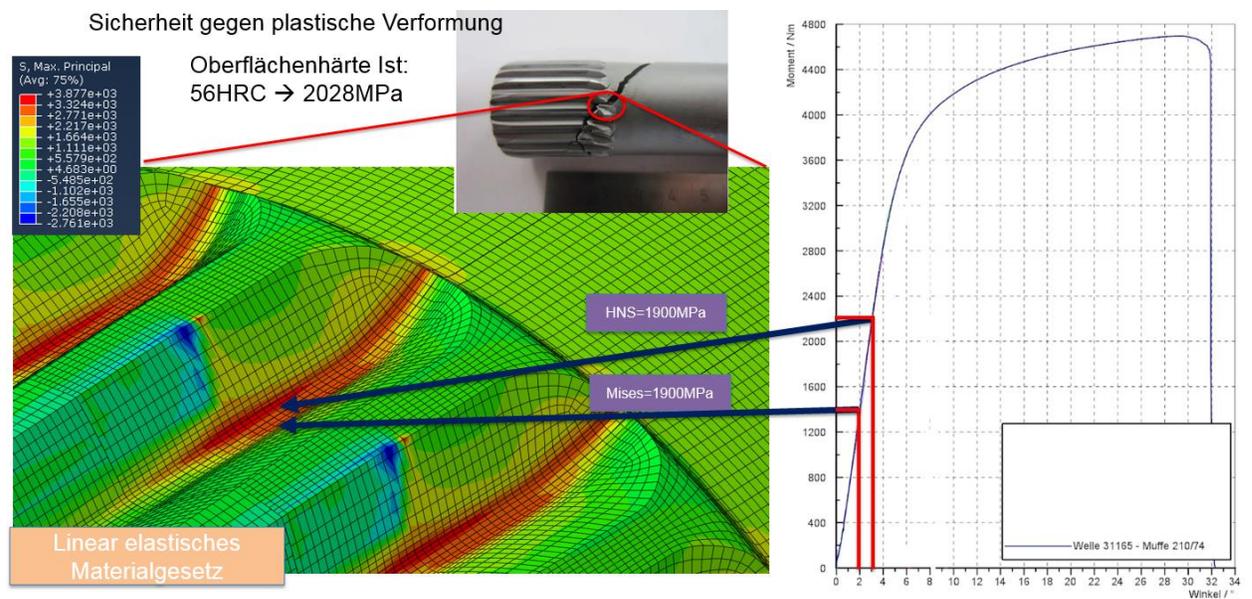


Abbildung 127: Gegenüberstellung zum Moment / Verdrehwinkeldiagramm

11. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei zyklisch symmetrischen Kerben unter statischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge: Steckverzahnungen

In der werkstofftechnischen Analyse nach erfolgter Erprobung wurde eine Oberflächenhärte der Prüflinge im Bereich des Verzahnungsauslaufs von etwa 56 HRC ermittelt. Nach derzeit gültiger Norm (DIN EN ISO 18265:2014 [2]), Tabelle A1 entspricht dies umgewertet einer Zugfestigkeit von etwa 2028 MPa. Nimmt man an, dass ein Fließen dieses Materials in der Randschicht bei etwa 1900 MPa einsetzt, was einem Streckgrenzenverhältnis von $R_p / R_m = 0,94$ entsprechen würde (sehr hoch gewählt, aufgrund der spröden Randschicht) dann wäre das Fließkriterium in der Rechnung bereits zu Zeitpunkten (Belastungen) erreicht sein, in denen bei reiner Bewertung nach dem Versuch noch nicht von relevanter bzw. funktionseinschränkender plastischer Verformung gesprochen werden würde.

In der folgenden Abbildung ist wieder ein Diagramm dargestellt, in dem überblicksmäßig die Ergebnisse der Berechnung mit dem Versuch dargestellt werden sollen. Dieses Diagramm betrifft in diesem Fall nur den Abgleich von statischen Erprobungen, bei denen es im Steckverzahnungsauslauf zum Bruch gekommen ist, gegenübergestellt den FE- Berechnungen und der Berechnung nach KISSsoft. Somit werden wieder zwei Punktemengen visualisiert. Die rote Punktemenge kennzeichnet die errechneten Sicherheiten bei Festigkeitsberechnung mittels 3D- FE- Berechnung (Ausnutzung zyklischer Symmetrie). Die blaue Punktemenge stellt errechnete Sicherheiten durch Festigkeitsberechnung mit KISSsoft in Anlehnung an die FKM Richtlinie nach Nennspannungskonzept [1] (Kapitel 1), dar.

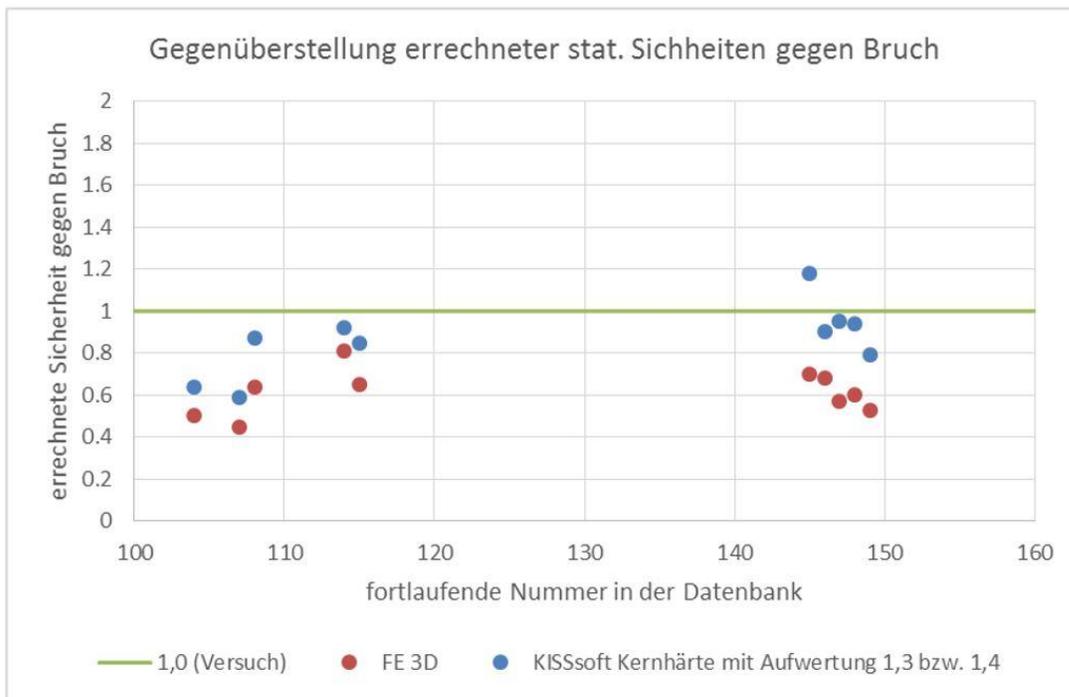


Abbildung 128:Gegenüberstellung errechneter Sicherheiten zum Versuch

11. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei zyklisch symmetrischen Kerben unter statischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge: Steckverzahnungen

Bei Eintrag Nr. 149, dem letzten rechts außen im Diagramm, handelt es sich um die einzige nichtgehärtete Welle der durchgeführten Nachrechnungen. In der KISSsoft- Nachrechnung wurde ihre Festigkeit somit nicht mit dem Faktor 1,3 bzw. 1,4 aufgewertet.

Zusammenfassend kann hier festgehalten werden: Bei Auswertung der statischen Sicherheit gegen Gewaltbruch durch 3D- FE- Modellierung und linear- elastischem Materialgesetz sind die Ergebnisse konservativ, wenn die niedrigsten Sicherheiten im Zahnfuß des Verzahnungsauslaufs, die sich auf einen sehr kleinen Bereich beschränken, als ausschlaggebend betrachtet werden. In der Rechnung nach Nennspannungskonzept treten diese sehr lokal begrenzten Spannungsspitzen aufgrund des Berechnungsablaufs nicht auf, womit die Ergebnisse hier optimistischer werden.

Eine Möglichkeit, mithilfe derer möglicherweise weniger konservative Ergebnisse durch die FE- Rechnung getroffen werden könnten, wäre eine Berechnung mittels elasto- plastischen Materialgesetzen. Hierdurch könnte möglicherweise die Stützwirkung von Elementen, die den kleinen Fleck der hohen Spannungskonzentration umgeben, besser nachgebildet werden.

Bis Modelle zur elasto- plastischen Berechnung, welche sich besonders im Hinblick auf die dünne, harte Randschicht als schwierig in der Umsetzung gestalten könnten, vorliegen, bleibt für Auslegungen in naher Zukunft die Möglichkeit, vorhandene Versuchsergebnisse und dazugehörige Rechnungen aus der Datenbank zu skalieren. Auch eine überschlägige Auslegung mittels Nennspannungskonzeptes könnte je nach Bedarf und Grund der Berechnung eingesetzt werden. Hochwertigere und genauere Analysen mittels FE und verbesserten Materialgesetzen sollten aber nach Möglichkeit zukünftig die Methode der Wahl bleiben.

12. Erfassung des Einflusses der Modellierung bei 3D Kerben

Um ausschließen zu können, dass dieses im vorigen Kapitel beschriebene Phänomen der lokal sehr hohen Spannungsüberhöhung durch die Elementierung, dem Ausnutzen der zyklischen Symmetrie anstatt dem Aufbau eines Vollmodells oder falscher Kontaktformulierung auftreten konnte, wurden Vergleichsrechnungen durchgeführt. Außerdem sollte damit grundsätzlich der Einfluss der Elementwahl und der Vernetzung diskutiert werden.

An dieser Stelle sollen diese Ergebnisse noch einmal zusammengefasst werden. Durch die Vergleichsrechnungen wurde festgestellt, dass keinen relevanten Einfluss auf das Phänomen dieser lokal starken Spannungsüberhöhung im Zahngrund die folgenden Faktoren hatten:

- **Elementierung:**

Bei 6 Versuchsnachrechnungen wurden parallel vier Modelle aufgebaut. Im ersten wurde das gesamte Modell mithilfe von Hexaedern vernetzt (Elementtyp C3D8I). Im zweiten wurden die Zähne und ein großzügig gewählter Bereich darunter mit quadratischen Tetraedern (C3D10) vernetzt, der Grundkörper wieder mit linearen Hexaedern. Im dritten Modell wurden statt der C3D10- Elemente die C3D10I- Elemente gewählt, ansonsten gleicher Modellaufbau. Die Bereiche wurden mithilfe eines Tie- Contacts (Abaqus Keyword *tie) mit den linearen Hexaedern (C3D8I) des Grundkörpers verbunden. Im vierten Modellaufbau wurden im gesamten Modell quadratische Hexaeder- Elemente (C3D20) verwendet. Schlussendlich konnte bei der vorhandenen Netzfeinheit kein relevanter Unterschied im Ergebnis festgestellt werden. Es sei aber erwähnt, dass dies nur bei der vorhandenen Netzfeinheit zutrifft. Bei gröberen Netzen treten dadurch sehr wohl, sogar sehr stark unterschiedliche, Spannungen und schlussendlich errechnete Sicherheiten auf (Unterschiede ergaben sich im Bereich eines Faktors von 2).
 - **Modellierung und Ausnutzen der zyklischen Symmetrie:**

Es wurde ein „Tortenstückmodell“ eines Zahns der Welle und eines Zahns der Gegenverzahnung erstellt und die Rechnung durchgeführt, wobei zyklische Symmetrie mithilfe des ABAQUS- Keywords *cyclic symmetry genutzt wurde. Anschließend wurde das Modell 25-mal (=Anzahl der Zähne auf dieser Steckverzahnung) jeweils kopiert und um $14,4^\circ$ um die Rotationsachse gedreht, um daraus ein Vollmodell aufzubauen. In den Ergebnissen der beiden Rechnungen ließen sich schlussendlich keine relevanten Abweichungen sowohl in den Spannungen als auch danach in den durch FEMFAT berechneten Sicherheiten feststellen (durchschnittliche Abweichung in den Spannungen weniger als 1%, in einem Punkt konnte eine Abweichung der Spannungen um 1,8% festgestellt werden).
 - **Kantenbruch / Kantenverrundung im Modell:**

In den bisherigen Abbildungen zu den Steckverzahnungen ist ersichtlich, dass die Kanten der Zähne unverrundet sind. Das entspricht nicht ganz den tatsächlich bei der Erprobung vorhandenen Bauteilen. Minimal abgerundete Kanten (z.B. im Bereich kleiner 0,1mm Rundungsradius) sind bei den realen Bauteilen immer vorhanden. Außerdem zeigt sich in
-

12. Erfassung des Einflusses der Modellierung bei 3D Kerben

der FE- Rechnung durch die unvernndeten Kanten oft eine hohe Druckspannung in den Kontaktknoten der Kanten.

Es wurden daher bei zwei Nachrechnungen zwei Modelle aufgebaut, wobei im einen Modell die Kanten verrundet / gebrochen wurden, im anderen spitz blieben. Es zeigte sich zwar, dass dies auf die Spannungen in genau den Knoten der Kanten bzw. im Kontakt hat, allerdings nicht mehr auf die Spannungen im Zahnfuß des Auslaufs.

13. Über die Durchführung von Nachrechnungen dynamischer Erprobungen

Im Gegensatz zu den statischen Erprobungen wird in diesem Kapitel nicht mehr zwischen rotationssymmetrischen Kerben und Steckverzahnungen unterschieden. Der Grund dafür liegt darin, dass in den allermeisten Fällen bei dynamischen Erprobungen ein Rissausgang im Auslauf der Steckverzahnungen festgestellt wurde. Für eine eigene Auswertung zu Tendenzen bzw. Auffälligkeiten rein rotationssymmetrischer Kerben würden also zu wenige Versuchsergebnisse vorliegen. Da die Nachrechnung einer Bruchstelle an einer rotationssymmetrischen Kerbe allerdings sehr gut mit dem Versuch übereinstimmte, wird auf dieses Ergebnis in der späteren Diskussion aber noch einmal genauer eingegangen.

In den Versuchsnachrechnungen mittels FEMFAT wurde in Anlehnung an die in Entwicklungsprozessen angewandte Vorgangsweise jene Belastungsamplitude gewählt, die die zum Prüfling gehörende B50 Wöhlerlinie bei einer Referenzlastwechselzahl von 200.000 Lastwechseln aufweist.

Für die Nachrechnung in KISSsoft wurde aus gleichem Grund jene Belastungsamplitude gewählt, die die zum Prüfling gehörende B50 Wöhlerlinie aus dem Versuch ebenfalls bei einer bestimmten Referenzlastwechselzahl Lastwechseln aufweist. Allerdings handelt es sich hierbei um eine Referenzlastwechselzahl von $1e6$ Lastwechseln. Dies folgt aus der Berechnungsmethodik in KISSsoft: Da ein Dauerfestigkeitsnachweis geführt wird, für den eine Lastwechselzahl von $1e6$ Lastwechseln in KISSsoft hinterlegt ist, wurde auch die Belastungsamplitude dementsprechend angepasst. Würde stattdessen ein Zeitfestigkeitsnachweis geführt werden, würde KISSsoft mit einer pauschalen Wöhlerliniensteigung von $k=25$ für Torsionsbelastung bei randschichtverfestigten Bauteilen (nach Vorschlag der FKM Richtlinie) auf die entsprechende geforderte Lastwechselzahl zurückrechnen, was eine künstliche Abweichung zum Versuch zur Folge hätte, die in dieser Form bei Entwicklungsprozessen nicht auftritt.

Die FKM Richtlinie bietet für Ermüdungsfestigkeitsnachweise eine zweite, vorläufige Möglichkeit der Bewertung, in der der Einfluss der harten Randschicht auf die Ermüdungsfestigkeit besser berücksichtigt werden soll. Diese Möglichkeit wurde mit Version 2016 in KISSsoft implementiert und wurde für diese Nachrechnungen ebenfalls angewandt. Somit steht für die Festigkeitsbewertung randschichtverfestigter Bauteile eine dritte Möglichkeit zur Nachrechnung zur Verfügung.

Der in den Ermüdungsfestigkeitsnachweisen in Anlehnung an die FKM Richtlinie vorkommende Randschichtfaktor K_v nach Tabelle 2.3.8 [1] wurde in KISSsoft nach folgender Konvention manuell vorgegeben:

- Liegt am betrachteten Querschnitt einsatzgehärtete Oberfläche vor und ist der errechnete Kerbfaktor kleiner 1,5, wird $K_v=1,2$ gewählt.
 - Liegt am betrachteten Querschnitt einsatzgehärtete Oberfläche vor und ist der errechnete Kerbfaktor größer 1,5, wird $K_v=1,3$ gewählt.
-

13. Über die Durchführung von Nachrechnungen dynamischer Erprobungen

- Liegt am betrachteten Querschnitt einsatzgehärtete Oberfläche vor und handelt es sich an diesem Querschnitt um die Kerbform Steckverzahnung, wird $K_v=1,0$ gewählt (siehe hierzu die Empfehlung in der FKM Richtlinie [1], Gleichung 5.3.24. Diese wird automatisch in KISSsoft umgesetzt.
 - Liegt am betrachteten Querschnitt induktionsgehärtete Oberfläche vor und ist der errechnete Kerbfaktor kleiner 1,5, wird $K_v=1,4$ gewählt.
 - Liegt am betrachteten Querschnitt induktionsgehärtete Oberfläche vor und ist der errechnete Kerbfaktor größer 1,5, wird $K_v=2,0$ gewählt.
 - Handelt es sich am betrachteten Querschnitt um ungehärtete Oberfläche, wird $K_v= 1,0$ gewählt.
-

14. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei dynamischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge

Einsatzgehärtete Antriebswelle aus 20MnCr5

Datenbankeintrag Nummer 118_63

Material: 20MnCr5

Oberflächenbehandlung: Einsatzgehärtet

Anzahl an dynamisch erprobten Bauteilen (gültig für die Ermittlung einer gemeinsamen Wöhlerlinie): 16

Geometrische Kerbe an der Bruchstelle: Steckverzahnungsauslauf

Zähnezahl: 34

Fußkreisdurchmesser: 25,96 mm

Kopfkreisdurchmesser: 27,8 mm

Normalmodul: 0,79375 mm

Bohrungsdurchmesser an Bruchstelle: 0 mm

Kernhärte Ist: 42,7 HRC

Tabelle zur Umwertung der Kernhärte in Festigkeit nach DIN 18265: A1

Zugfestigkeit im Kern, umgewertet aus Kernhärte: 1350 MPa

Oberflächenhärte Ist: 60,99 HRC

Zugfestigkeit der Oberfläche, umgewertet aus Oberflächenhärte in Anlehnung an DIN 18265: 2430 MPa

CHD 550 HV1: 0,99 mm

Moment aus Wöhlerlinie der Erprobung bei 200.000 Lastwechseln wechselnder Beanspruchung: +/-
1739 Nm

Moment aus Wöhlerlinie der Erprobung bei 1e6 Lastwechseln wechselnder Beanspruchung: +/- 1375 Nm

Wöhlerliniensteigung für diese Bruchstelle, ermittelt durch Versuch: 8,7

14. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei dynamischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge

Errechnete Sicherheit durch KISSsoft in Anlehnung an die FKM- Richtlinie, Kapitel 2, mit der Kernhärte als Berechnungseingangswert: 0,74

Errechnete Sicherheit durch KISSsoft in Anlehnung an die FKM- Richtlinie, Kapitel 5.5, mit der Kernhärte als Berechnungseingangswert: 0,77

Errechnete Sicherheit durch FEMFAT, 3D FE- Modell, Elementtyp Tetraeder C3D10: 0,63

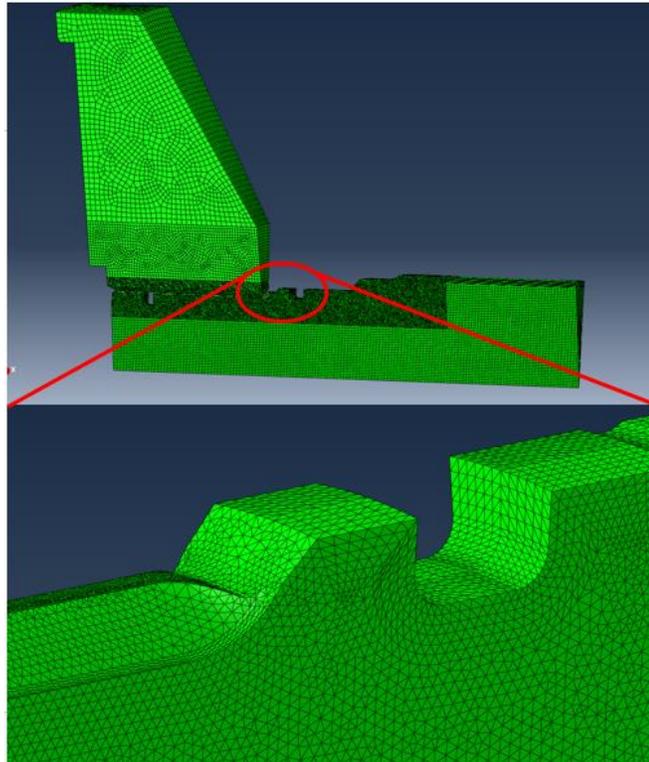


Abbildung 129: Modellaufbau zu Nr. 118_63

14. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei dynamischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge

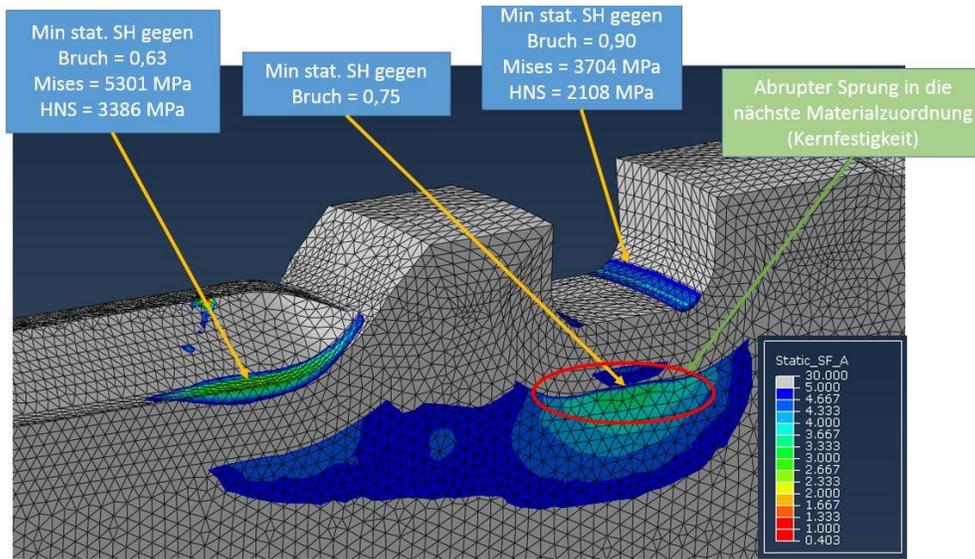


Abbildung 130: Errechnete Sicherheiten zu Nr. 118_63

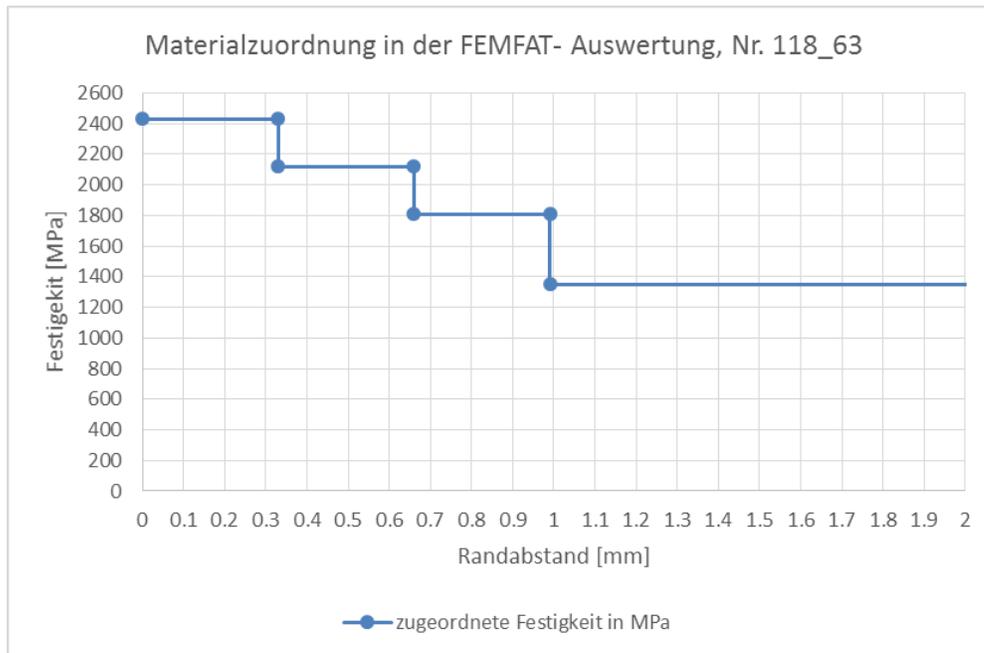


Abbildung 131: Verlauf der Materialzuordnung zu Nr. 118_63

14. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei dynamischer Belastung
und daraus abgeleitete Datenbankeinträge

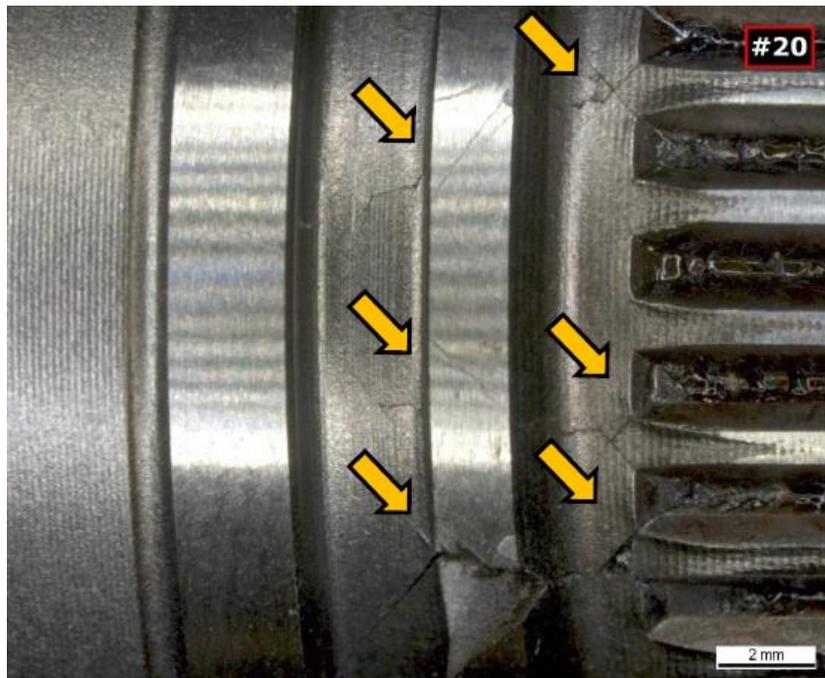


Abbildung 132: Bruchbild zu Nr. 118_63

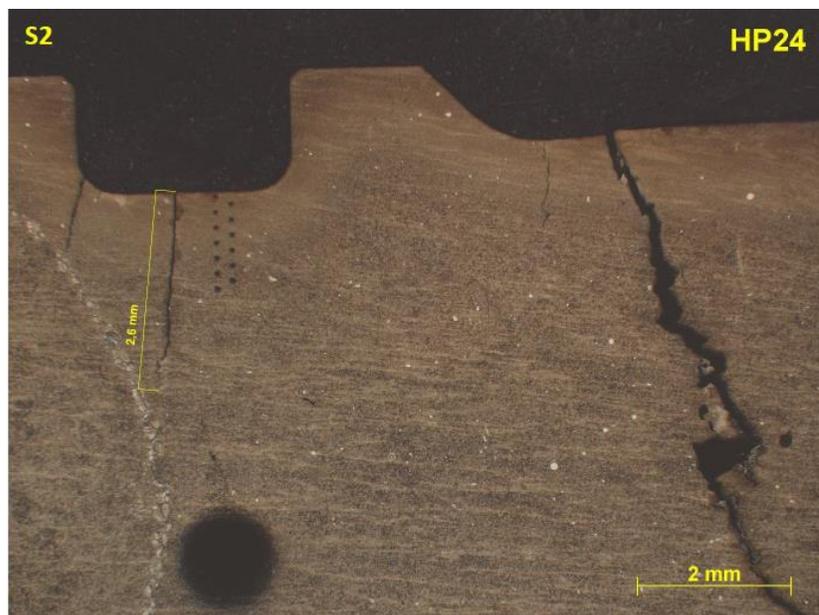


Abbildung 133: Schliffbild zu Nr. 118_63

14. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei dynamischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge

Einsatzgehärtete Antriebswelle aus 28MnCrB7-2

Datenbankeintrag Nummer 156_64

Material: 28MnCrB7-2

Oberflächenbehandlung: Einsatzgehärtet

Anzahl an dynamisch erprobten Bauteilen (gültig für die Ermittlung einer gemeinsamen Wöhlerlinie): 10

Geometrische Kerbe an der Bruchstelle: Sonderform eines Einstichs in einer Steckverzahnung

Zähnezahl: 43

Fußkreisdurchmesser: 32,6 mm

Normalmodul: 0,79375 mm

Einstichbreite: ~ 2 mm

Einstichtiefe: ~ 0,73 mm

Bohrungsdurchmesser an Bruchstelle: 0 mm

Kernhärte Ist: 48,1 HRC

Tabelle zur Umwertung der Kernhärte in Festigkeit nach DIN 18265: A1

Zugfestigkeit im Kern, umgewertet aus Kernhärte: 1578 MPa

Oberflächenhärte Ist: 59,8 HRC

Zugfestigkeit der Oberfläche, umgewertet aus Oberflächenhärte in Anlehnung an DIN 18265: 2334 MPa

CHD 620 HV1: 0,56 mm

Moment aus Wöhlerlinie der Erprobung bei 200.000 Lastwechseln wechselnder Beanspruchung: +/- 2560 Nm

Moment aus Wöhlerlinie der Erprobung bei 1e6 Lastwechseln wechselnder Beanspruchung: +/- 1735 Nm

Wöhlerliniensteigung für diese Bruchstelle, ermittelt durch Versuch: 6,1

Errechnete Sicherheit durch KISSsoft in Anlehnung an die FKM- Richtlinie, Kapitel 2, mit der Kernhärte als Berechnungseingangswert: 0,74

Errechnete Sicherheit durch FEMFAT, 3D FE- Modell, Elementtyp Tetraeder C3D10: 0,88

14. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei dynamischer Belastung
und daraus abgeleitete Datenbankeinträge

Errechnete Sicherheit durch FEMFAT, 3D FE- Modell, Elementtyp Tetraeder C3D10: 0,87

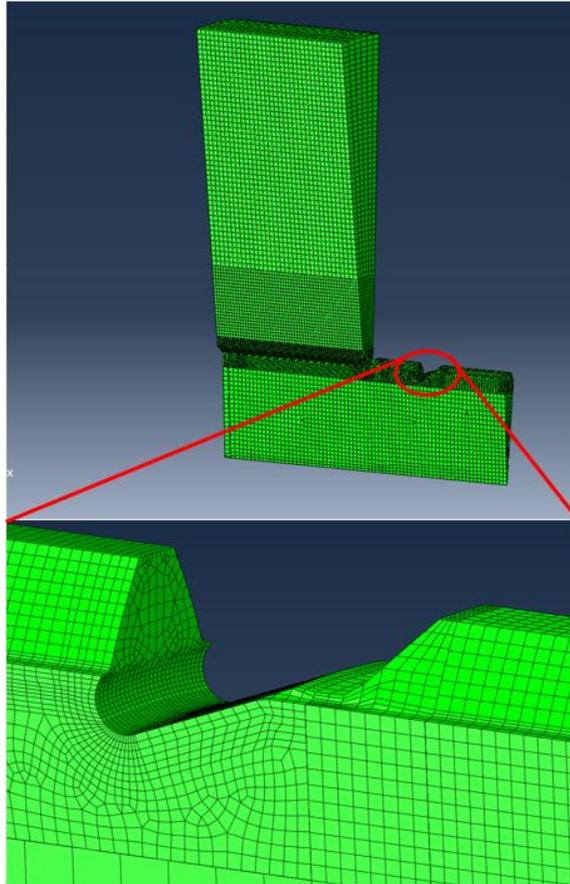


Abbildung 134: Modellaufbau zu Nr. 156_64 Hexaeder

14. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei dynamischer Belastung
und daraus abgeleitete Datenbankeinträge

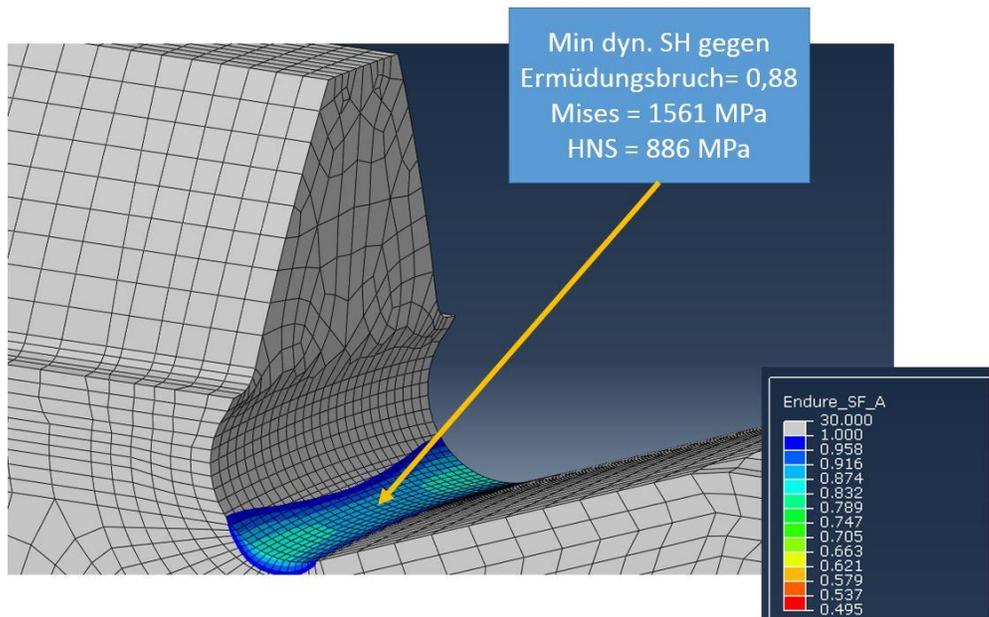


Abbildung 135: Errechnete Sicherheiten zu Nr. 156_64 Hexaeder

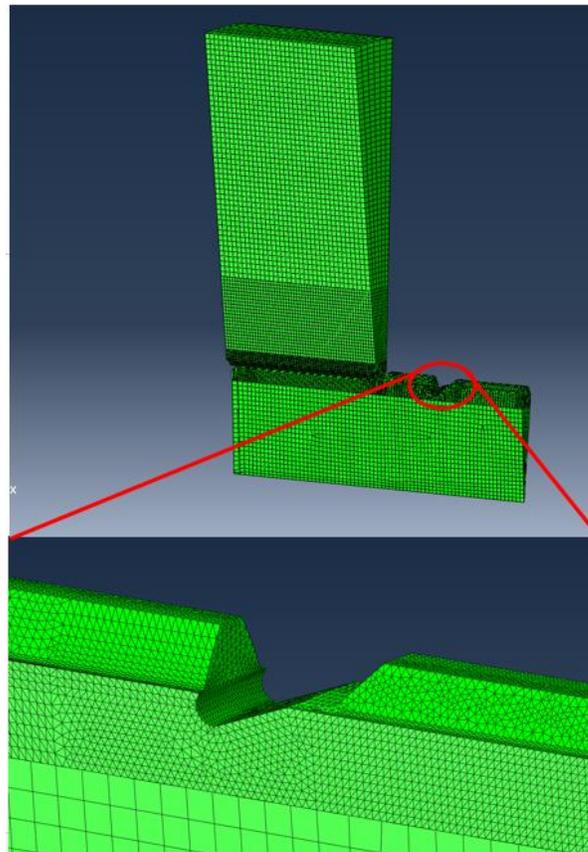


Abbildung 136: Modellaufbau zu Nr. 156_64 Tetraeder

14. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei dynamischer Belastung
und daraus abgeleitete Datenbankeinträge

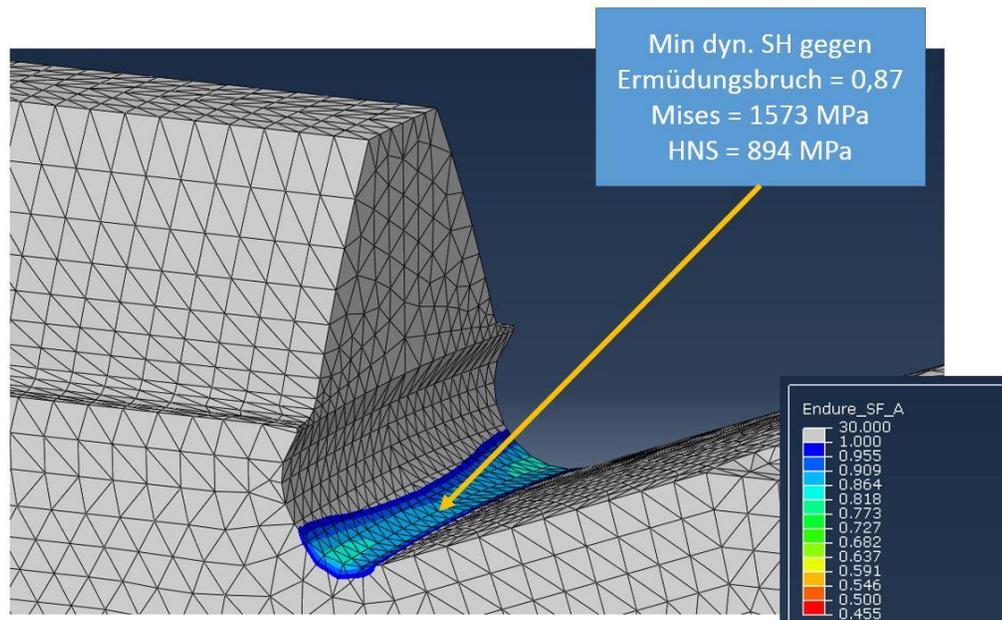


Abbildung 137: Errechnete Sicherheiten zu Nr. 156_64 Tetraeder



Abbildung 138: Bruchbild zu Nr. 156_64

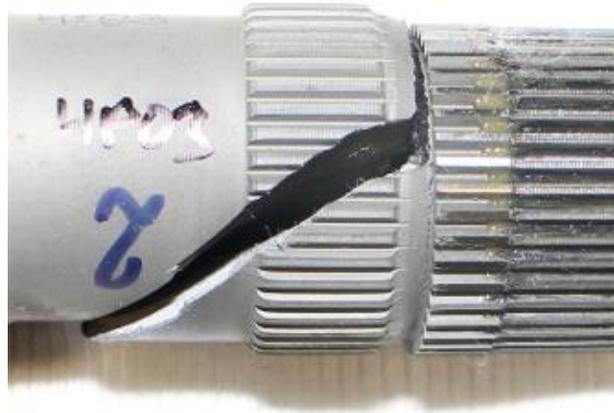


Abbildung 139: Bruchbild zu Nr. 156_64

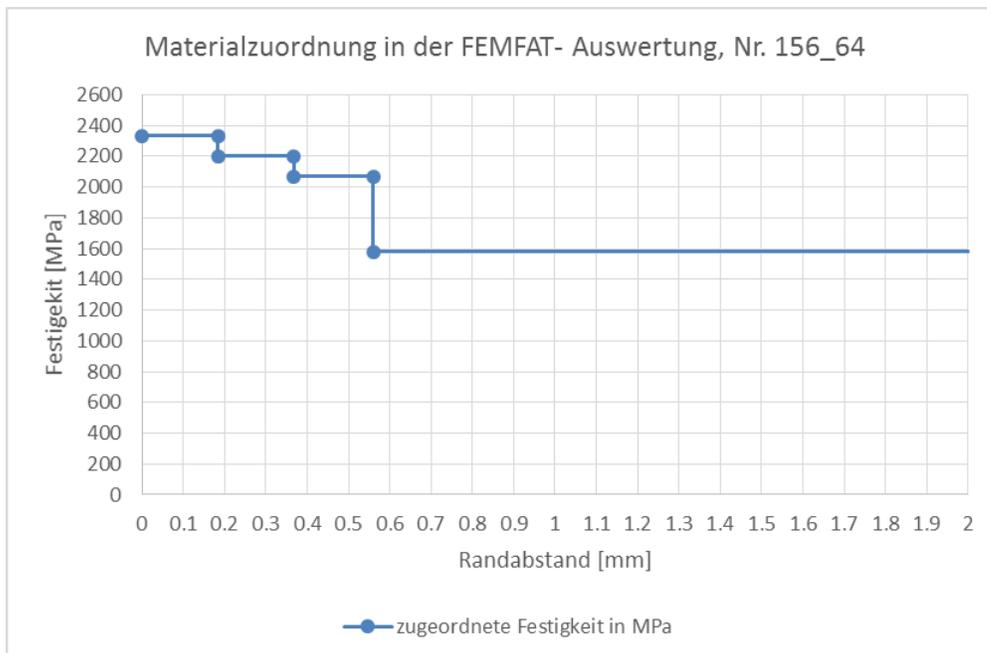


Abbildung 140: Verlauf der Materialzuordnung zu Nr. 156_64

14. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei dynamischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge

Einsatzgehärtete Antriebswelle aus 29MnCrB5-2

Datenbankeintrag Nummer 202_65

Material: 29MnCrB5-2

Oberflächenbehandlung: Einsatzgehärtet

Anzahl an dynamisch erprobten Bauteilen (gültig für die Ermittlung einer gemeinsamen Wöhlerlinie): 10

Geometrische Kerbe an der Bruchstelle: Steckverzahnungsauslauf

Zähnezahl: 31

Fußkreisdurchmesser: 31,6 mm

Kopfkreisdurchmesser: 33,9 mm

Normalmodul: 1,05833 mm

Bohrungsdurchmesser an Bruchstelle: 10 mm

Kernhärte Ist: 44,98 HRC

Tabelle zur Umwertung der Kernhärte in Festigkeit nach DIN 18265: A1

Zugfestigkeit im Kern, umgewertet aus Kernhärte: 1441 MPa

Oberflächenhärte Ist: 59,78 HRC

Zugfestigkeit der Oberfläche, umgewertet aus Oberflächenhärte in Anlehnung an DIN 18265: 2332 MPa

CHD 620 HV1: 0,53 mm

Moment aus Wöhlerlinie der Erprobung bei 200.000 Lastwechseln wechselnder Beanspruchung: +/- 2625 Nm

Moment aus Wöhlerlinie der Erprobung bei 1e6 Lastwechseln wechselnder Beanspruchung: +/- 1678 Nm

Wöhlerliniensteigung für diese Bruchstelle, ermittelt durch Versuch: 4,6

Errechnete Sicherheit durch KISSsoft in Anlehnung an die FKM- Richtlinie, Kapitel 2, mit der Kernhärte als Berechnungseingangswert: 1,3

Errechnete Sicherheit durch KISSsoft in Anlehnung an die FKM- Richtlinie, Kapitel 5.5, mit der Kernhärte als Berechnungseingangswert: 1,1

Errechnete Sicherheit durch FEMFAT, 3D FE- Modell, Elementtyp Tetraeder C3D10: 0,73

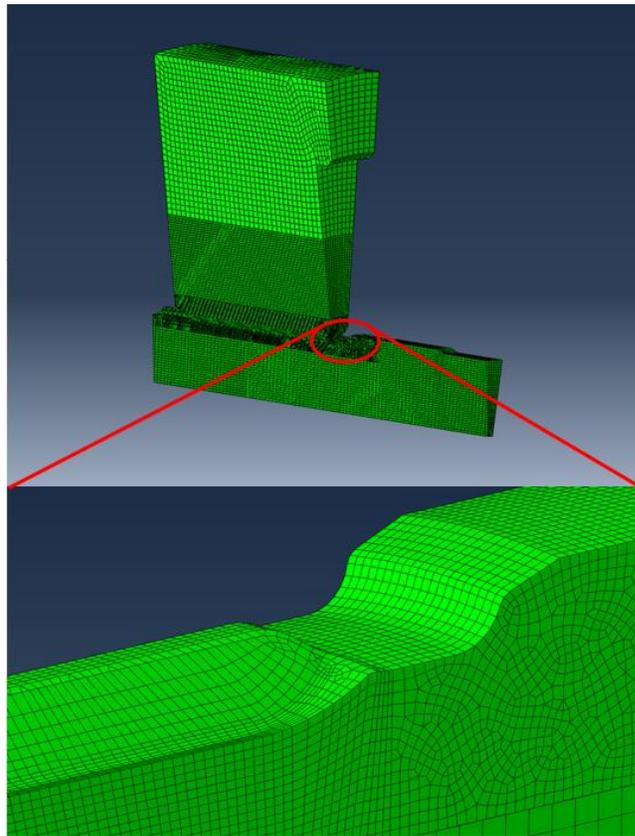


Abbildung 141: Modellaufbau zu Nr. 202_65

14. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei dynamischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge

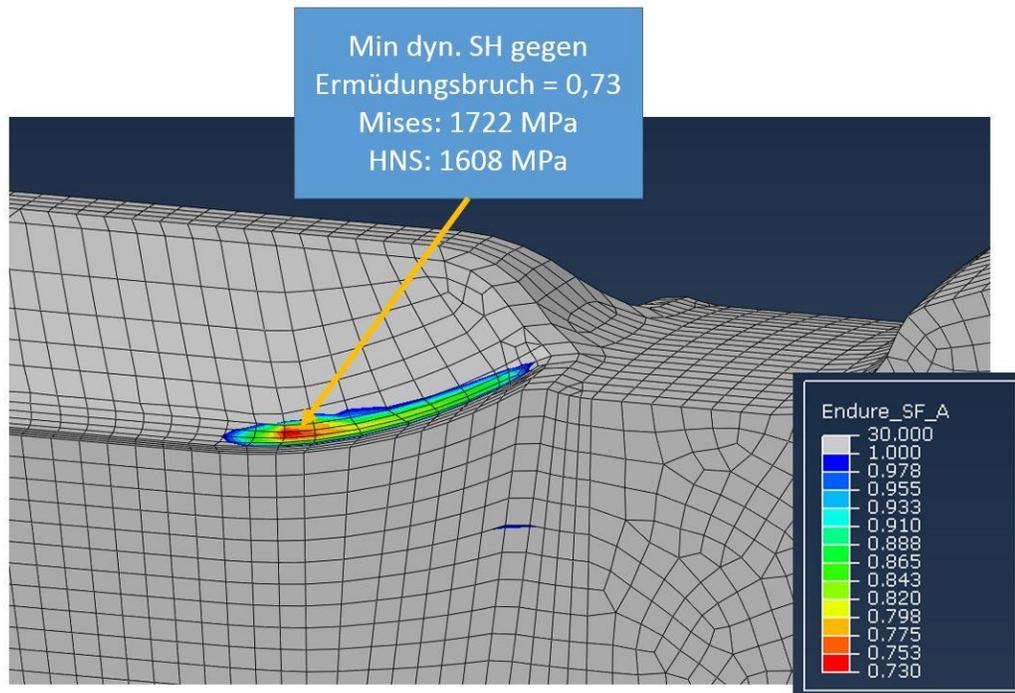


Abbildung 142: Errechnete Sicherheiten zu Nr. 202_65

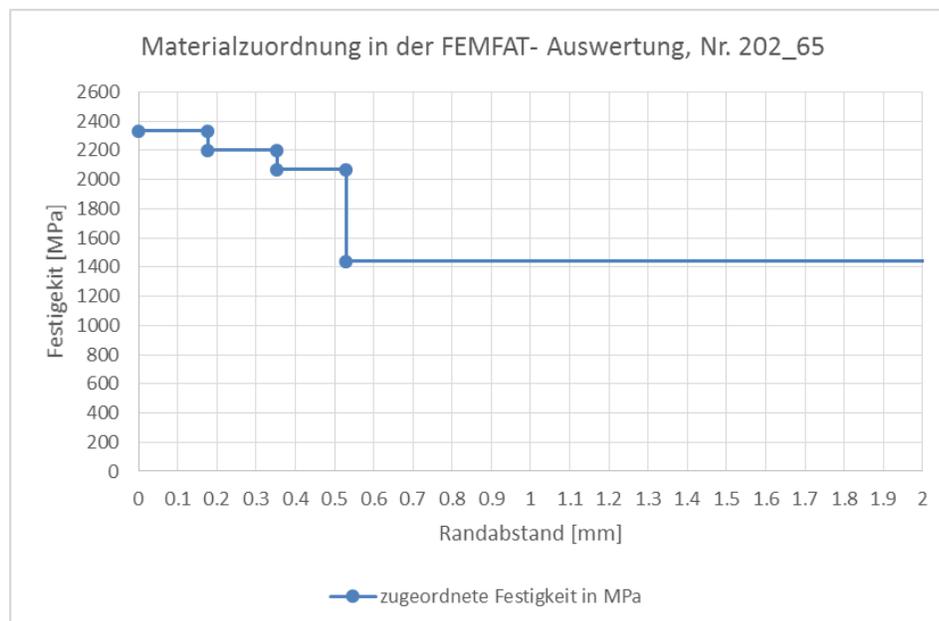


Abbildung 143: Verlauf der Materialzuordnung zu Nr. 202_65

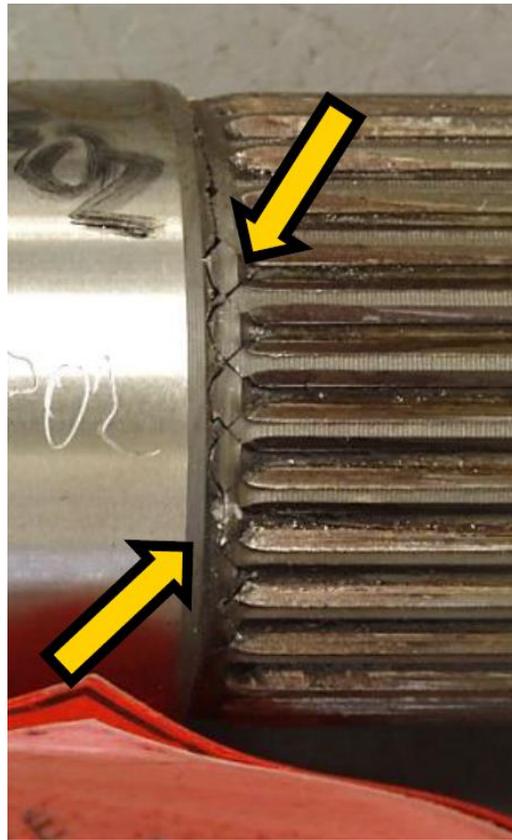


Abbildung 144: Bruchbild zu Nr. 202_65



Abbildung 145: Schliff zu Nr. 202_65

14. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei dynamischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge

Einsatzgehärtete Antriebswelle aus 28MnCrB7-2

Datenbankeintrag Nummer 224_66

Material: 28MnCrB7-2

Oberflächenbehandlung: Einsatzgehärtet

Anzahl an dynamisch erprobten Bauteilen (gültig für die Ermittlung einer gemeinsamen Wöhlerlinie):

Geometrische Kerbe an der Bruchstelle: Steckverzahnungsauslauf

Zähnezahl: 25

Fußkreisdurchmesser: 25,39 mm

Kopfkreisdurchmesser: 27,5 mm

Normalmodul: 1,05833 mm

Bohrungsdurchmesser an Bruchstelle: 0 mm

Kernhärte Ist: 47,2 HRC

Tabelle zur Umwertung der Kernhärte in Festigkeit nach DIN 18265: A1

Zugfestigkeit im Kern, umgewertet aus Kernhärte: 1533 MPa

Oberflächenhärte Ist: 60,1 HRC

Zugfestigkeit der Oberfläche, umgewertet aus Oberflächenhärte in Anlehnung an DIN 18265: 2358 MPa

CHD 620 HV1: 0,66 mm

Moment aus Wöhlerlinie der Erprobung bei 200.000 Lastwechseln wechselnder Beanspruchung: +/- 1345 Nm

Moment aus Wöhlerlinie der Erprobung bei 1e6 Lastwechseln wechselnder Beanspruchung: +/- 853 Nm

Wöhlerliniensteigung für diese Bruchstelle, ermittelt durch Versuch: 12

Errechnete Sicherheit durch KISSsoft in Anlehnung an die FKM- Richtlinie, Kapitel 2, mit der Kernhärte als Berechnungseingangswert: 1,38

Errechnete Sicherheit durch KISSsoft in Anlehnung an die FKM- Richtlinie, Kapitel 5.5, mit der Kernhärte als Berechnungseingangswert: 1,13

Errechnete Sicherheit durch FEMFAT, 3D FE- Modell, Elementtyp Tetraeder C3D10: 0,82

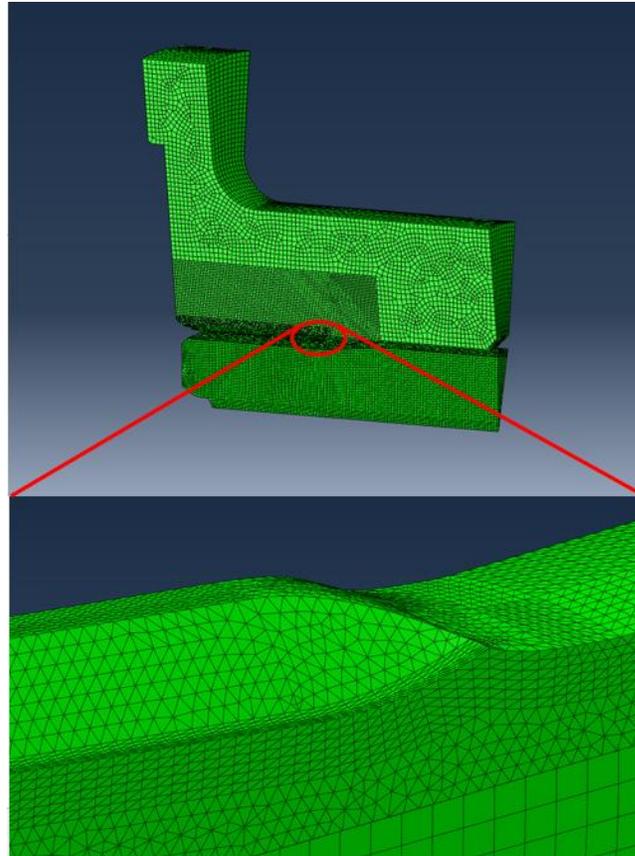


Abbildung 146: Modellaufbau zu Nr. 224_66

14. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei dynamischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge

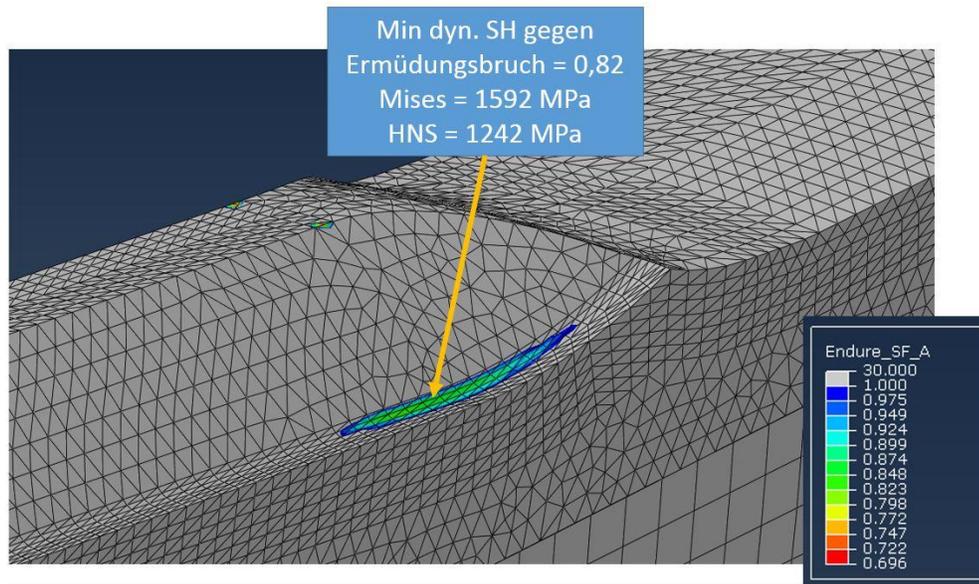


Abbildung 147: Errechnete Sicherheiten zu Nr. 224_66

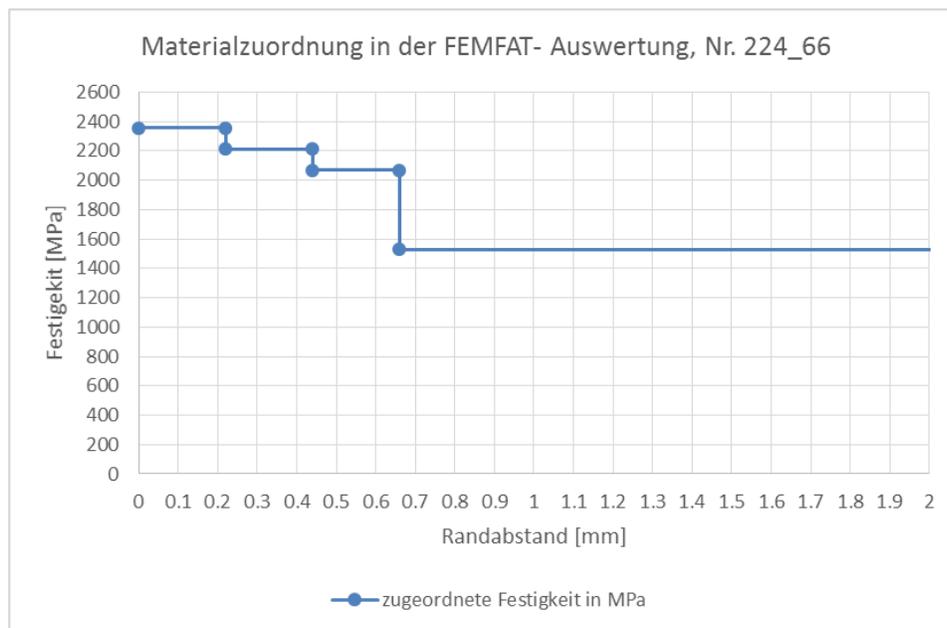


Abbildung 148: Verlauf der Materialzuordnung zu Nr. 224_66



Abbildung 149: Bruchbild zu Nr. 224_66

Induktionsgehärtete Antriebswelle aus C45E

Datenbankeintrag Nummer 241_73

Material: C45E

Oberflächenbehandlung: Induktionsgehärtet

Anzahl an dynamisch erprobten Bauteilen (gültig für die Ermittlung einer gemeinsamen Wöhlerlinie): 8

Geometrische Kerbe an der Bruchstelle: Steckverzahnungsauslauf

Zähnezahl: 37

Fußkreisdurchmesser: 28,04 mm

Kopfkreisdurchmesser: 30 mm

Normalmodul: 0,79375 mm

Bohrungsdurchmesser an Bruchstelle: 0 mm

Kernhärte Ist: 215,5 HV10

14. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei dynamischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge

Tabelle zur Umwertung der Kernhärte in Festigkeit nach DIN 18265: A1

Zugfestigkeit im Kern, umgewertet aus Kernhärte: 750 MPa

Oberflächenhärte Ist: 56,65 HRC

Zugfestigkeit der Oberfläche, umgewertet aus Oberflächenhärte in Anlehnung an DIN 18265: 2095 MPa

CHD 480HV1: 3,3 mm

Moment aus Wöhlerlinie der Erprobung bei 200.000 Lastwechseln wechselnder Beanspruchung: +/- 2307 Nm

Moment aus Wöhlerlinie der Erprobung bei 1e6 Lastwechseln wechselnder Beanspruchung: +/- 1625 Nm

Wöhlerliniensteigung für diese Bruchstelle, ermittelt durch Versuch: 6,7

Errechnete Sicherheit durch KISSsoft in Anlehnung an die FKM- Richtlinie, Kapitel 2, mit der Kernhärte als Berechnungseingangswert: 0,64

Errechnete Sicherheit durch KISSsoft in Anlehnung an die FKM- Richtlinie, Kapitel 5.5, mit der Kernhärte als Berechnungseingangswert: 0,97

Errechnete Sicherheit durch FEMFAT, 3D FE- Modell, Elementtyp Tetraeder C3D10: 0,58

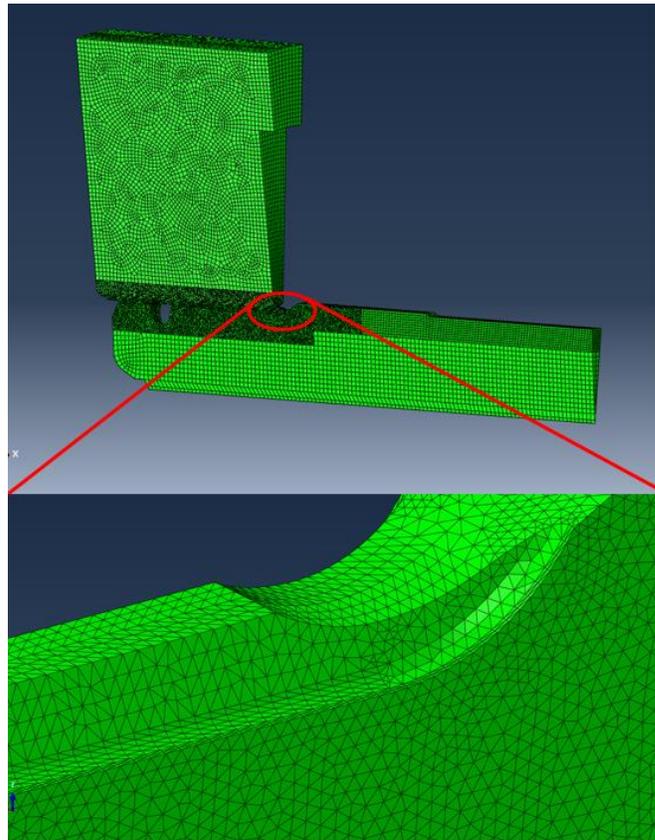


Abbildung 150: Modellaufbau zu Nr. 241_73

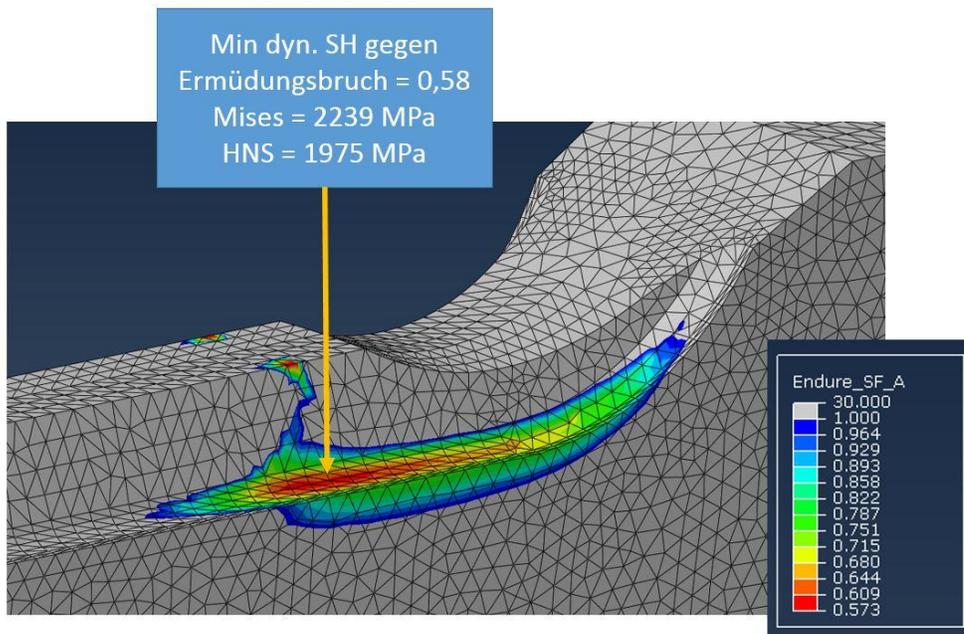


Abbildung 151: Errechnete Sicherheiten zu Nr. 241_73

14. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei dynamischer Belastung
und daraus abgeleitete Datenbankeinträge

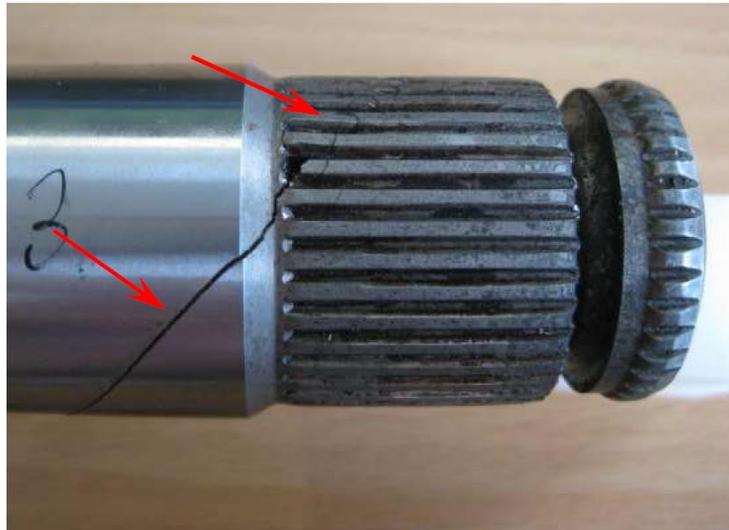


Abbildung 152: Bruchbild zu Nr. 241_73

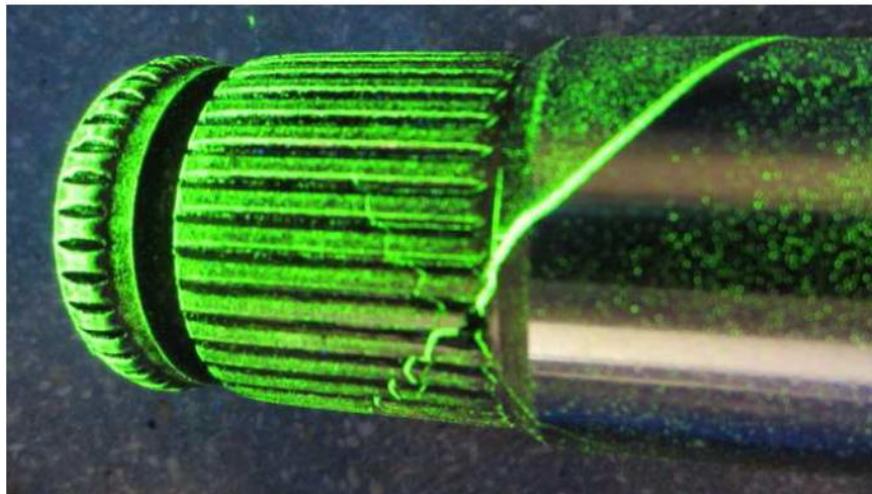


Abbildung 153: Bruchbild zu Nr. 241_73

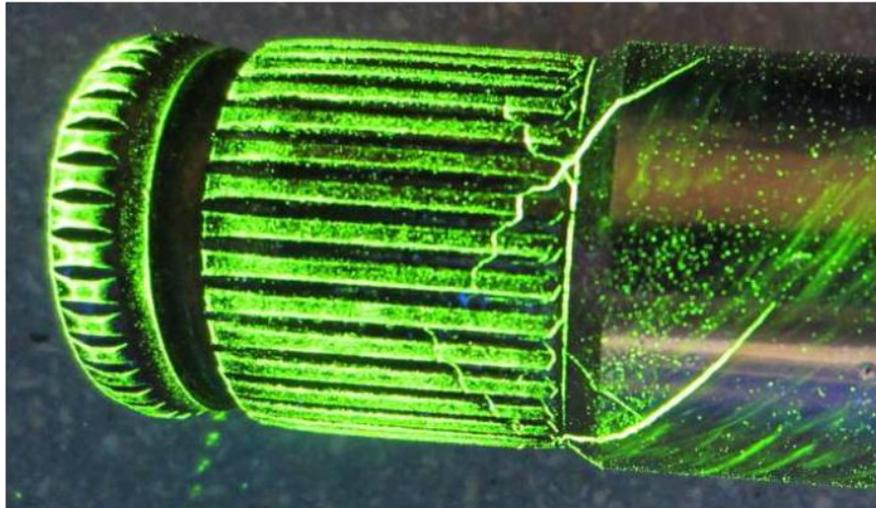


Abbildung 154: Bruchbild zu Nr. 241_73

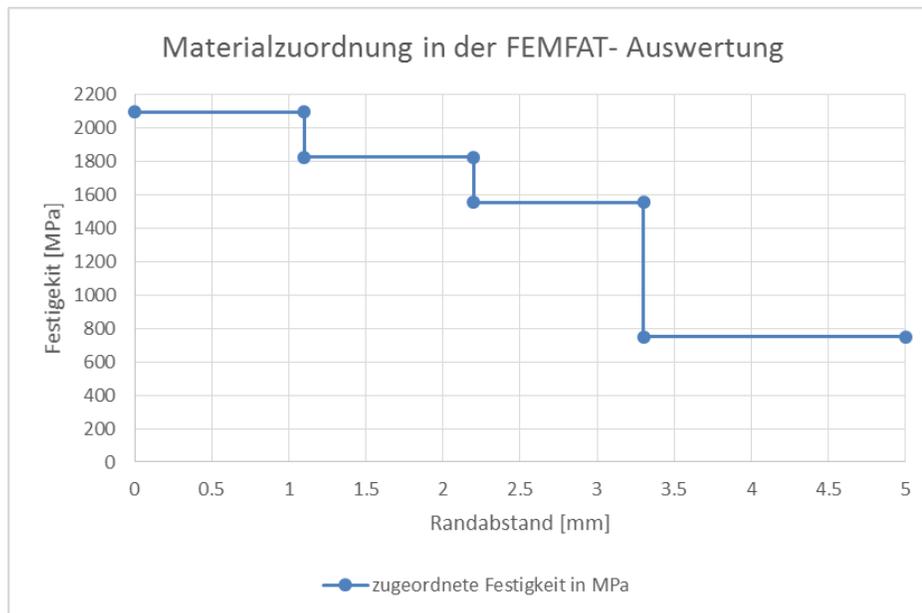


Abbildung 155: Verlauf der Materialzuordnung zu Nr. 241_73

Einsatzgehärtete Antriebswelle aus 20MnCr5

Datenbankeintrag Nummer 258_71

Material: 20MnCr5

Oberflächenbehandlung: Einsatzgehärtet

14. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei dynamischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge

Anzahl an dynamisch erprobten Bauteilen (gültig für die Ermittlung einer gemeinsamen Wöhlerlinie): 4

Anzahl an für eine Ermittlung einer Wöhlerlinie gültigen Prüflinge eigentlich zu gering. Da auf einem der gewählten Lastniveaus aber zwei Prüflinge vorliegen, die bei fast genau 200.000 Lastwechseln ausfielen, was der Referenzlastwechselzahl in FEMFAT entspricht, wird der Prüflauf aber trotzdem als gültig für eine Nachrechnung angesehen. Da die Steigung der Wöhlerlinie dadurch aber weniger abgesichert ist als bei den anderen nachgerechneten Erprobungen, sollte dies bei Betrachtung und Gegenüberstellung mit anderen Nachrechnungen im Hinterkopf behalten werden.

Geometrische Kerbe an der Bruchstelle: Steckverzahnungsauslauf

Zähnezahl: 37

Fußkreisdurchmesser: 28,04 mm

Kopfkreisdurchmesser: 30 mm

Normalmodul: 0,79375 mm

Bohrungsdurchmesser an Bruchstelle: 0 mm

Kernhärte Ist: 246 HBW

Tabelle zur Umwertung der Kernhärte in Festigkeit nach DIN 18265: A1

Zugfestigkeit im Kern, umgewertet aus Kernhärte: 832 MPa

Oberflächenhärte Ist: 784 HV

Zugfestigkeit der Oberfläche, umgewertet aus Oberflächenhärte in Anlehnung an DIN 18265: 2699,5 MPa

CHD 550HV1: 1,03 mm

Moment aus Wöhlerlinie der Erprobung bei 200.000 Lastwechseln wechselnder Beanspruchung: +/- 1782 Nm

Moment aus Wöhlerlinie der Erprobung bei 1e6 Lastwechseln wechselnder Beanspruchung: +/- 1474 Nm

Wöhlerliniensteigung für diese Bruchstelle, ermittelt durch Versuch: 14

Errechnete Sicherheit durch KISSsoft in Anlehnung an die FKM- Richtlinie, Kapitel 2, mit der Kernhärte als Berechnungseingangswert: 0,59

Errechnete Sicherheit durch KISSsoft in Anlehnung an die FKM- Richtlinie, Kapitel 5.5, mit der Kernhärte als Berechnungseingangswert: 0,89

Errechnete Sicherheit durch FEMFAT, 3D FE- Modell, Elementtyp Tetraeder C3D10: 0,82

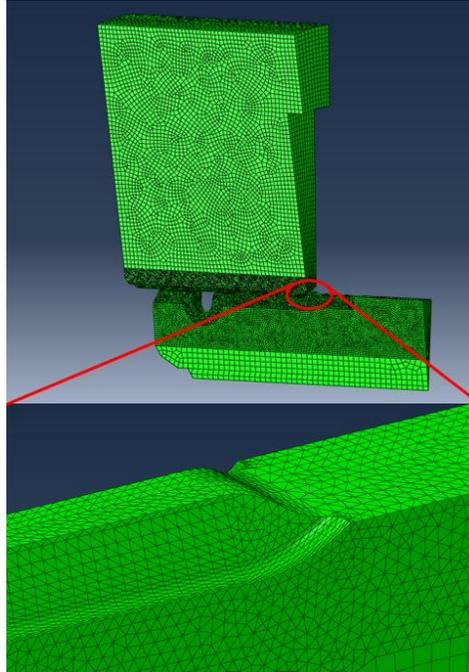


Abbildung 156: Modellaufbau zu Nr. 258_71

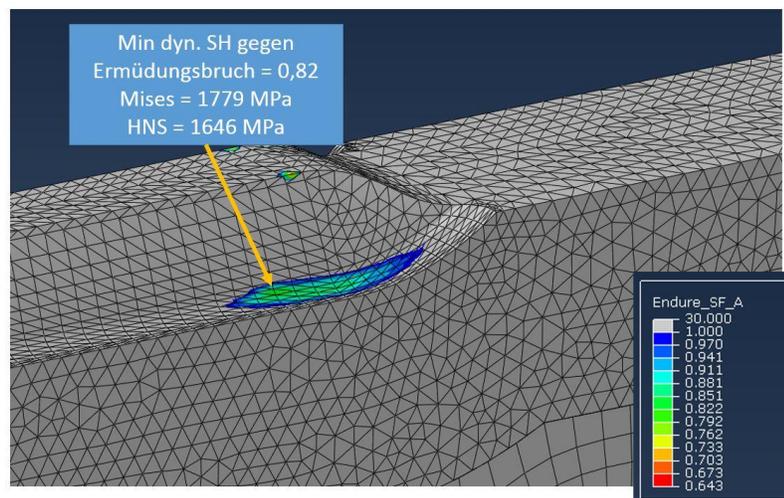


Abbildung 157: Errechnete Sicherheiten zu Nr. 258_71

14. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei dynamischer Belastung
und daraus abgeleitete Datenbankeinträge

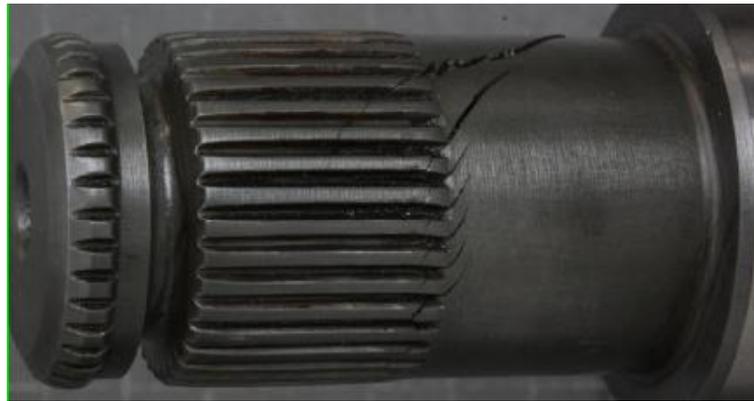


Abbildung 158: Bruchbild zu Nr. 258_71

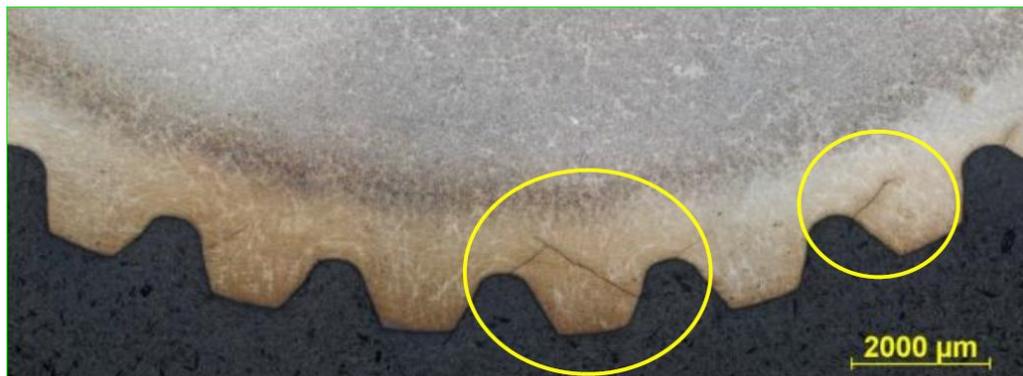


Abbildung 159: Schliffbild zu Nr. 258_71



Abbildung 160: Schliffbild zu Nr. 258_71

14. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei dynamischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge

Induktionsgehärtete Antriebswelle aus 38MnVS6

Datenbankeintrag Nummer 258_72

Material: 38MnVS6

Oberflächenbehandlung: Induktionsgehärtet

Anzahl an dynamisch erprobten Bauteilen (gültig für die Ermittlung einer gemeinsamen Wöhlerlinie): 4

Anzahl an für eine Ermittlung einer Wöhlerlinie gültigen Prüflinge eigentlich zu gering. Da auf einem der gewählten Lastniveaus aber zwei Prüflinge vorliegen, die bei fast genau 200.000 Lastwechseln ausfielen, was der Referenzlastwechselzahl in FEMFAT entspricht, wird der Prüflauf aber trotzdem als gültig für eine Nachrechnung angesehen. Da die Steigung der Wöhlerlinie dadurch aber weniger abgesichert ist als bei den anderen nachgerechneten Erprobungen, sollte dies bei Betrachtung und Gegenüberstellung mit anderen Nachrechnungen im Hinterkopf behalten werden.

Geometrische Kerbe an der Bruchstelle: Steckverzahnungsauslauf

Zähnezahl: 37

Fußkreisdurchmesser: 28,5 mm

Kopfkreisdurchmesser: 28,04 mm

Normalmodul: 0,79375 mm

Bohrungsdurchmesser an Bruchstelle: 0 mm

Kernhärte Ist: 29,4 HRC

Tabelle zur Umwertung der Kernhärte in Festigkeit nach DIN 18265: B2

Zugfestigkeit im Kern, umgewertet aus Kernhärte: 916 MPa

Oberflächenhärte Ist: 623 HV

Zugfestigkeit der Oberfläche, umgewertet aus Oberflächenhärte in Anlehnung an DIN 18265: 2081 MPa

EHT 480 HV1: 2,51 mm

Moment aus Wöhlerlinie der Erprobung bei 200.000 Lastwechseln wechselnder Beanspruchung: +/- 1794 Nm

Moment aus Wöhlerlinie der Erprobung bei 1e6 Lastwechseln wechselnder Beanspruchung: +/- 1463 Nm

Wöhlerliniensteigung für diese Bruchstelle, ermittelt durch Versuch: 8,1

14. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei dynamischer Belastung
und daraus abgeleitete Datenbankeinträge

Errechnete Sicherheit durch KISSsoft in Anlehnung an die FKM- Richtlinie, Kapitel 2, mit der Kernhärte als
Berechnungseingangswert: 0,78

Errechnete Sicherheit durch KISSsoft in Anlehnung an die FKM- Richtlinie, Kapitel 5.5, mit der Kernhärte
als Berechnungseingangswert: 0,95

Errechnete Sicherheit durch FEMFAT, 3D FE- Modell, Elementtyp Tetraeder C3D10: 0,78

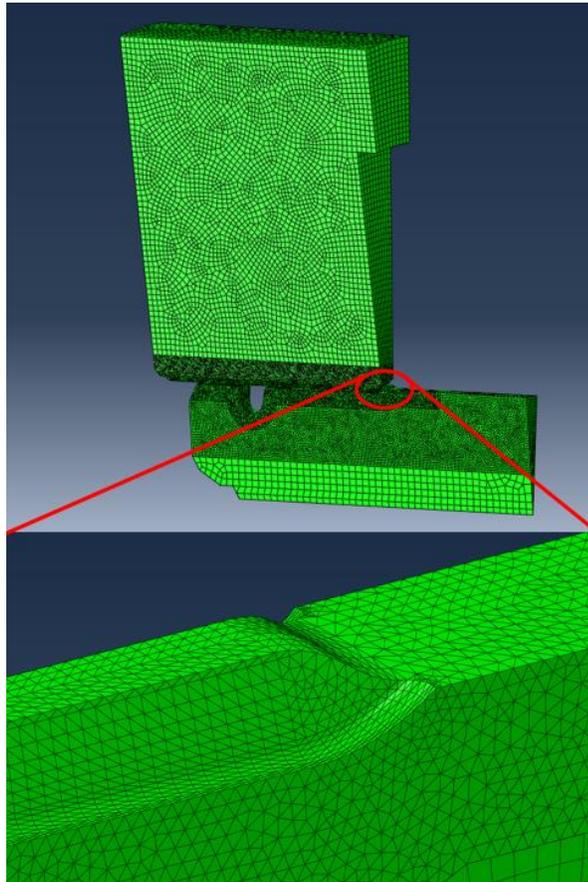


Abbildung 161: Modellaufbau zu Nr. 258_72

14. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei dynamischer Belastung
und daraus abgeleitete Datenbankeinträge

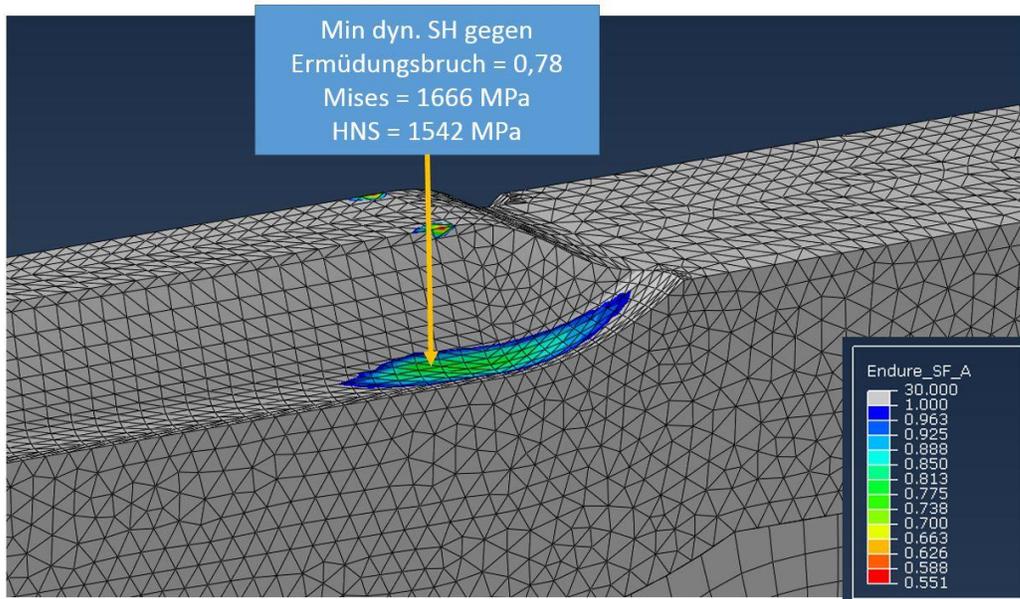


Abbildung 162: Errechnete Sicherheiten zu Nr. 258_72

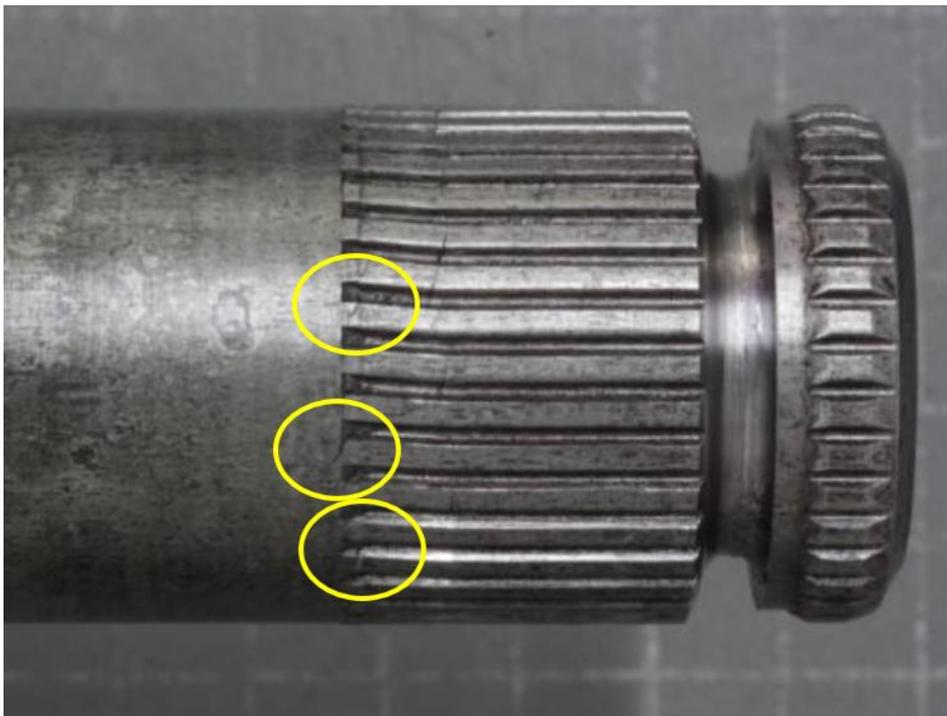


Abbildung 163: Bruchbild zu Nr. 258_72

14. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei dynamischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge

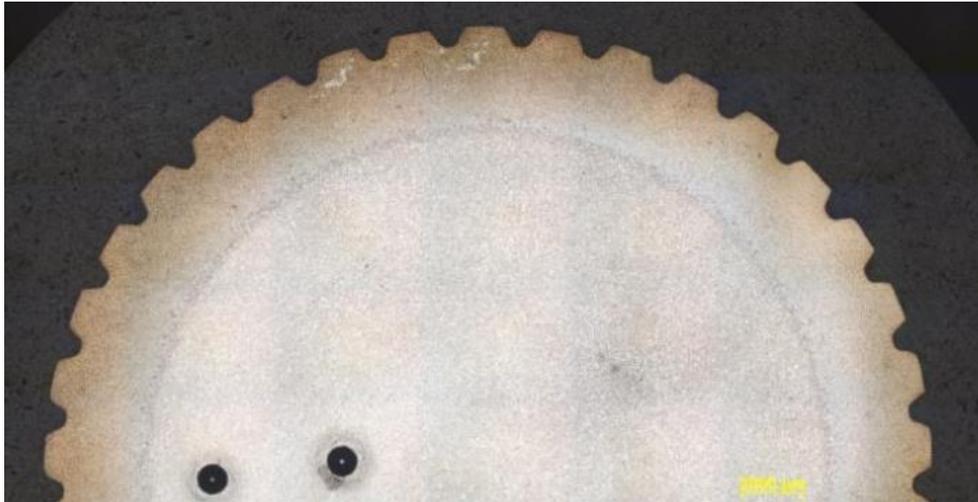


Abbildung 164: Schliffbild zu Nr. 258_72

Einsatzgehärtete Antriebswelle aus 20MnCr5

Datenbankeintrag Nummer 268_70

Material: 20MnCr5

Oberflächenbehandlung: Einsatzgehärtet

Anzahl an dynamisch erprobten Bauteilen (gültig für die Ermittlung einer gemeinsamen Wöhlerlinie): 6

Geometrische Kerbe an der Bruchstelle: Steckverzahnungsauslauf

Zähnezahl: 25

Fußkreisdurchmesser: 25,39 mm

Kopfkreisdurchmesser: 27,5 mm

Normalmodul: 1,05833 mm

Bohrungsdurchmesser an Bruchstelle: 0 mm

Kernhärte Ist: 43 HRC

Tabelle zur Umwertung der Kernhärte in Festigkeit nach DIN 18265: A1

Zugfestigkeit im Kern, umgewertet aus Kernhärte: 1362 MPa

Oberflächenhärte Ist: 62 HRC

Zugfestigkeit der Oberfläche, umgewertet aus Oberflächenhärte in Anlehnung an DIN 18265: 2515 MPa

CHD 550HV1: 0,67 mm

Moment aus Wöhlerlinie der Erprobung bei 200.000 Lastwechseln wechselnder Beanspruchung: +/- 1464 Nm

Moment aus Wöhlerlinie der Erprobung bei 1e6 Lastwechseln wechselnder Beanspruchung: +/- 1114 Nm

Wöhlerliniensteigung für diese Bruchstelle, ermittelt durch Versuch: 6,9

Errechnete Sicherheit durch KISSsoft in Anlehnung an die FKM- Richtlinie, Kapitel 2, mit der Kernhärte als Berechnungseingangswert: 0,94

Errechnete Sicherheit durch KISSsoft in Anlehnung an die FKM- Richtlinie, Kapitel 5.5, mit der Kernhärte als Berechnungseingangswert: 0,90

Errechnete Sicherheit durch FEMFAT, 3D FE- Modell, Elementtyp Tetraeder C3D10: 0,87

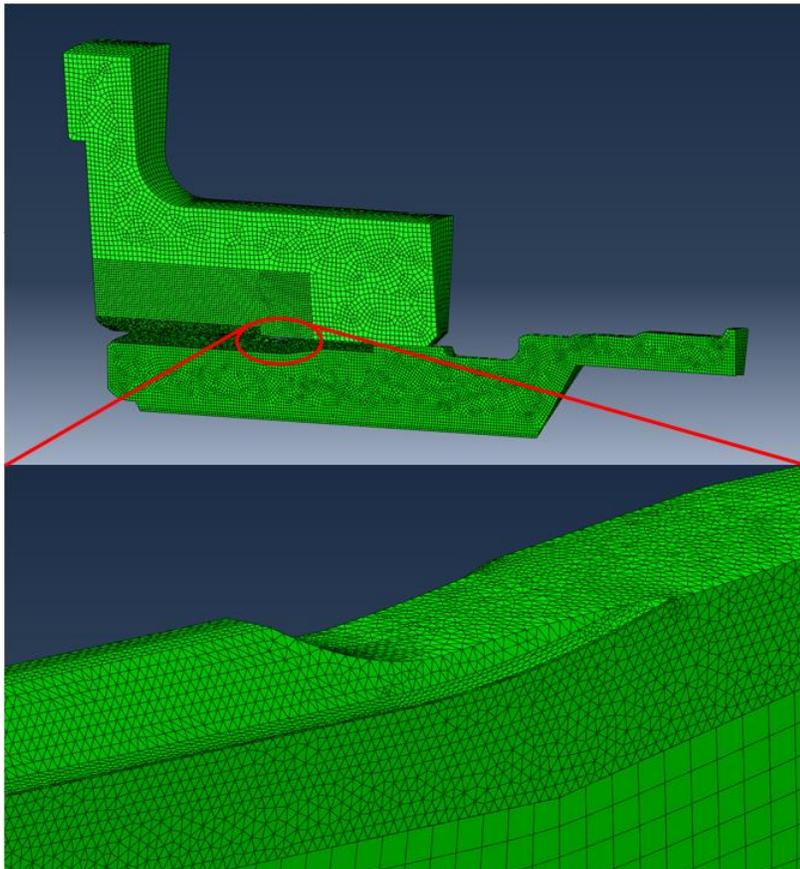


Abbildung 165: Modellaufbau zu Nr. 268_70

14. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei dynamischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge

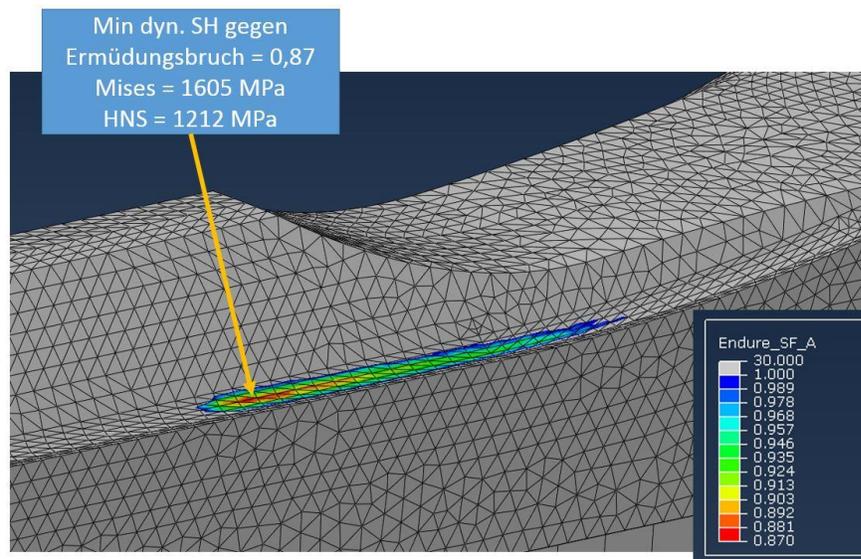


Abbildung 166: Errechnete Sicherheiten zu Nr. 268_70



Abbildung 167: Bruchbild zu Nr. 268_70

14. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei dynamischer Belastung
und daraus abgeleitete Datenbankeinträge

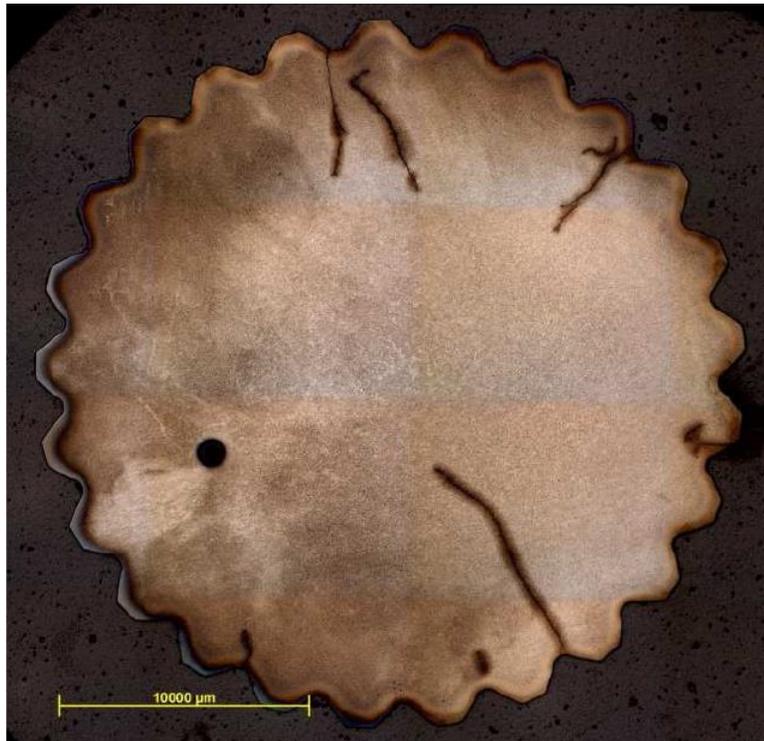


Abbildung 168: Schliffbild zu Nr. 268_70

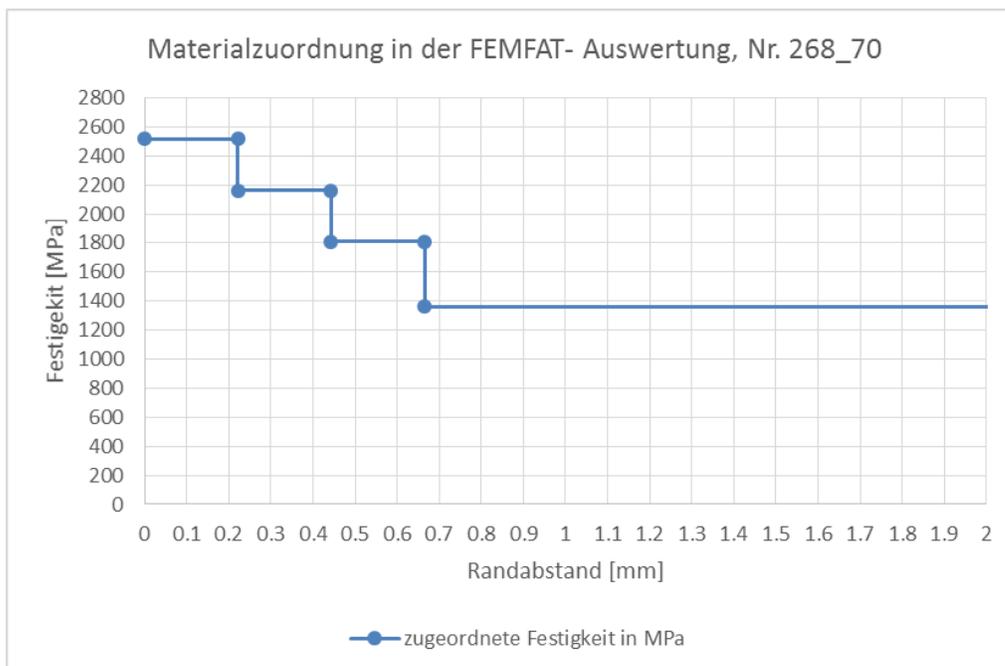


Abbildung 169: Verlauf der Materialzuordnung zu Nr. 268_70

14. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei dynamischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge

Induktionsgehärtete Antriebswelle aus C45E

Datenbankeintrag Nummer 374_67

Material: C45E

Oberflächenbehandlung: Induktionsgehärtet

Anzahl an dynamisch erprobten Bauteilen (gültig für die Ermittlung einer gemeinsamen Wöhlerlinie):

Geometrische Kerbe an der Bruchstelle: Steckverzahnungsauslauf

Zähnezahl: 37

Fußkreisdurchmesser: 28,04 mm

Kopfkreisdurchmesser: 30 mm

Normalmodul: 0,79375 mm

Bohrungsdurchmesser an Bruchstelle: 0 mm

Kernhärte Ist: 206,5 HBW

Tabelle zur Umwertung der Kernhärte in Festigkeit nach DIN 18265: A1

Zugfestigkeit im Kern, umgewertet aus Kernhärte: 698 MPa

Oberflächenhärte Ist: 693,75 HV1

Zugfestigkeit der Oberfläche, umgewertet aus Oberflächenhärte in Anlehnung an DIN 18265: 2341 MPa

EHT 480HV1: 2,75 mm

Moment aus Wöhlerlinie der Erprobung bei 200.000 Lastwechseln wechselnder Beanspruchung: +/- 2157 Nm

Moment aus Wöhlerlinie der Erprobung bei 1e6 Lastwechseln wechselnder Beanspruchung: +/- 1881 Nm

Wöhlerliniensteigung für diese Bruchstelle, ermittelt durch Versuch: 17,7

Errechnete Sicherheit durch KISSsoft in Anlehnung an die FKM- Richtlinie, Kapitel 2, mit der Kernhärte als Berechnungseingangswert: 0,40

Errechnete Sicherheit durch KISSsoft in Anlehnung an die FKM- Richtlinie, Kapitel 5.5, mit der Kernhärte als Berechnungseingangswert: 0,92

Errechnete Sicherheit durch FEMFAT, 3D FE- Modell, Elementtyp Tetraeder C3D10: 0,64

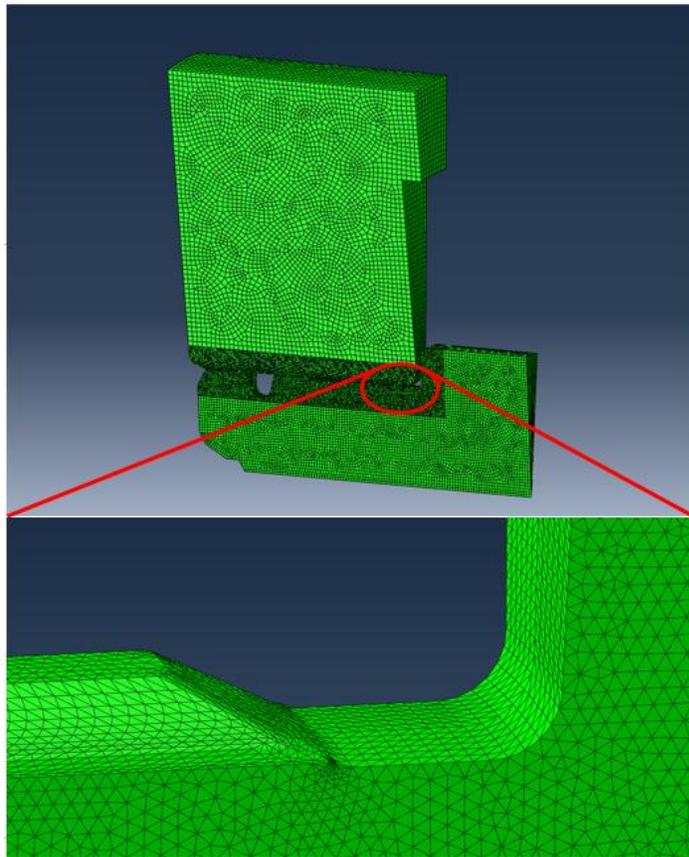


Abbildung 170: Modellaufbau zu Nr. 374_67

14. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei dynamischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge

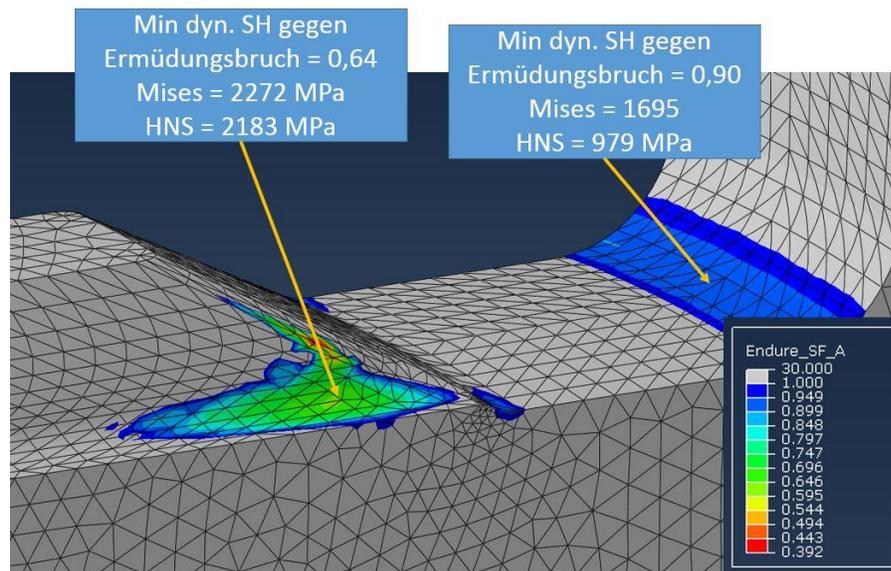


Abbildung 171: Errechnete Sicherheiten zu Nr. 374_67

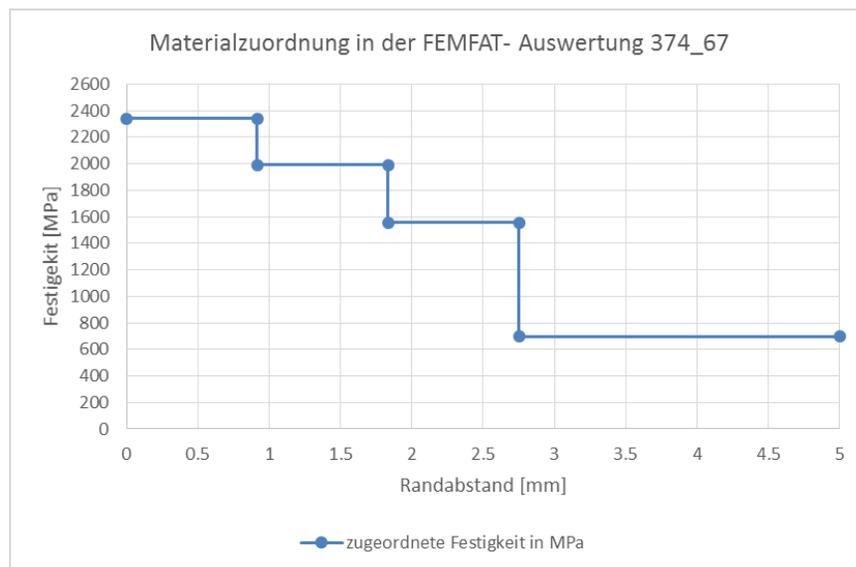


Abbildung 172: Verlauf der Materialzuordnung zu Nr. 374_67



Abbildung 173: Bruchbild zu Nr. 374_67



Abbildung 174: Bruchbild zu Nr. 374_67

14. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei dynamischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge

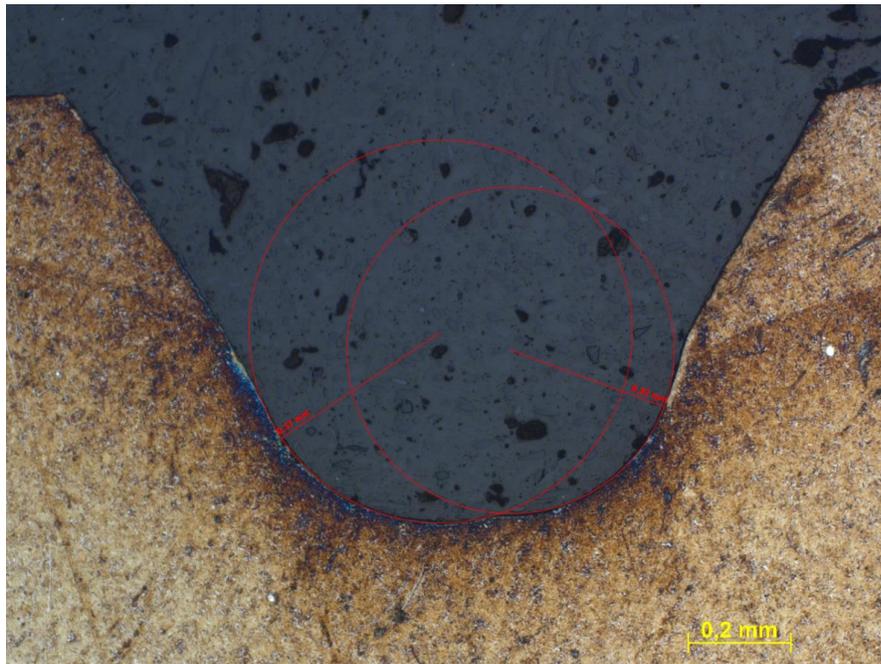


Abbildung 175: Schliffbild zu Nr. 374_67

Einsatzgehärtete Antriebswelle aus 19CrNiMo7-2

Datenbankeintrag Nummer 461_68

Material: 19CrNiMo7-6

Oberflächenbehandlung: Einsatzgehärtet

Anzahl an dynamisch erprobten Bauteilen (gültig für die Ermittlung einer gemeinsamen Wöhlerlinie): 6

Geometrische Kerbe an der Bruchstelle: Steckverzahnungsauslauf

Zähnezahl: 45

Fußkreisdurchmesser: 34,55 mm

Kopfkreisdurchmesser: 36,85 mm

Normalmodul: 0,79375 mm

Bohrungsdurchmesser an Bruchstelle: 0 mm

Kernhärte Ist: 36,33 HRC

14. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei dynamischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge

Tabelle zur Umwertung der Kernhärte in Festigkeit nach DIN 18265: A1

Zugfestigkeit im Kern, umgewertet aus Kernhärte: 1148 MPa

Oberflächenhärte Ist: 718 HV1

Zugfestigkeit der Oberfläche, umgewertet aus Oberflächenhärte in Anlehnung an DIN 18265: 2435 MPa

CHD 600HV1: 0,52 mm

Moment aus Wöhlerlinie der Erprobung bei 200.000 Lastwechseln wechselnder Beanspruchung: +/-
3267 Nm

Moment aus Wöhlerlinie der Erprobung bei 1e6 Lastwechseln wechselnder Beanspruchung: +/- 2652 Nm

Wöhlerliniensteigung für diese Bruchstelle, ermittelt durch Versuch: 9,7

Errechnete Sicherheit durch KISSsoft in Anlehnung an die FKM- Richtlinie, Kapitel 2, mit der Kernhärte als
Berechnungseingangswert: 0,78

Errechnete Sicherheit durch KISSsoft in Anlehnung an die FKM- Richtlinie, Kapitel 5.5, mit der Kernhärte
als Berechnungseingangswert: 0,90

Errechnete Sicherheit durch FEMFAT, 3D FE- Modell, Elementtyp Hexaeder C3D8I: 0,72

14. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei dynamischer Belastung
und daraus abgeleitete Datenbankeinträge

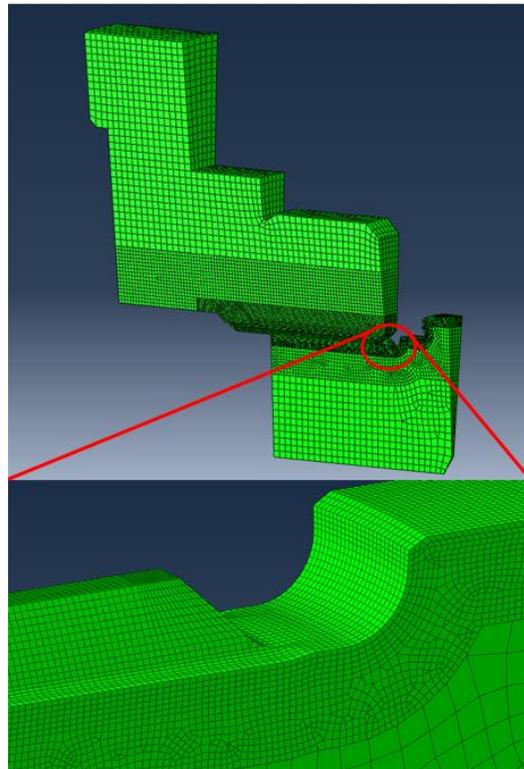


Abbildung 176: Modellaufbau zu Nr. 461_68

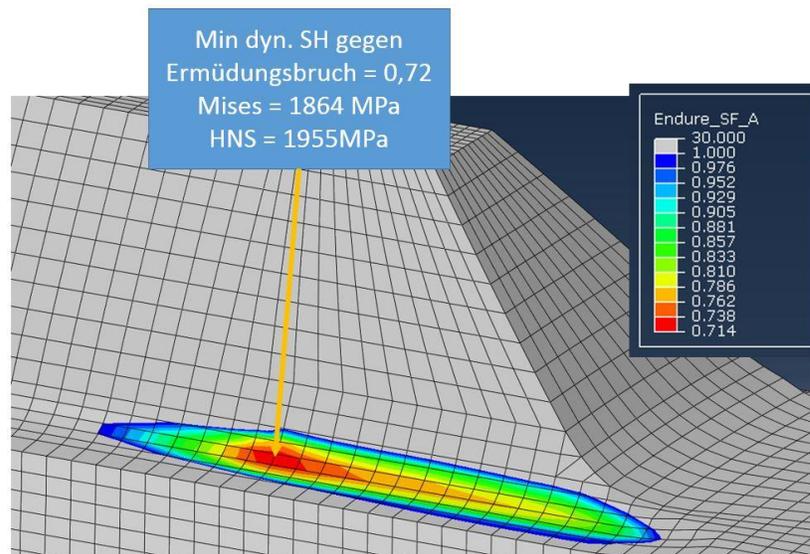


Abbildung 177: Errechnete Sicherheiten zu Nr. 461_68

14. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei dynamischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge

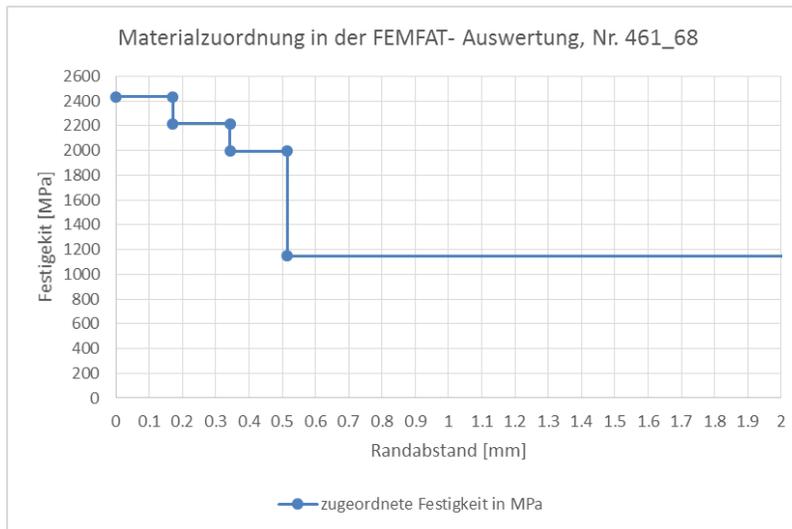


Abbildung 178: Verlauf der Materialzuordnung zu Nr. 461_68

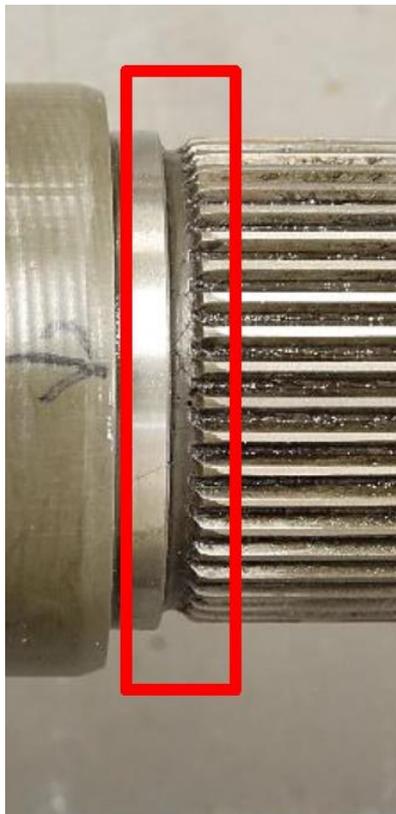


Abbildung 179: Bruchbild zu Nr. 461_68

14. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei dynamischer Belastung
und daraus abgeleitete Datenbankeinträge



Abbildung 180: Bruchbild zu Nr. 461_68



Abbildung 181: Schliffbild zu Nr. 461_68

Ungehärtete Flanschswelle aus 41CrS4
Datenbankeintrag Nummer 463_69

Material: 41CrS4

14. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei dynamischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge

Oberflächenbehandlung: Oberfläche nicht randschichtverfestigt

Anzahl an dynamisch erprobten Bauteilen (gültig für die Ermittlung einer gemeinsamen Wöhlerlinie): 10

Geometrische Kerbe an der Bruchstelle: Steckverzahnungsauslauf

Zähnezahl: 40

Fußkreisdurchmesser: 30,75 mm

Kopfkreisdurchmesser: 32,9 mm

Normalmodul: 0,794 mm

Bohrungsdurchmesser an Bruchstelle: 12 mm

Kernhärte Ist: 35,93 HRC

Tabelle zur Umwertung der Kernhärte in Festigkeit nach DIN 18265: B2

Zugfestigkeit im Kern, umgewertet aus Kernhärte: 1083 MPa

Oberflächenhärte Ist: gleich Kernhärte (nicht randschichtverfestigt), ~36 HRC

Zugfestigkeit der Oberfläche, umgewertet aus Oberflächenhärte in Anlehnung an DIN 18265: 1083 MPa

Moment aus Wöhlerlinie der Erprobung bei 200.000 Lastwechseln wechselnder Beanspruchung: +/- 2180 Nm

Moment aus Wöhlerlinie der Erprobung bei 1e6 Lastwechseln wechselnder Beanspruchung: +/- 1843 Nm

Wöhlerliniensteigung für diese Bruchstelle, ermittelt durch Versuch: 13,8

Errechnete Sicherheit durch KISSsoft in Anlehnung an die FKM- Richtlinie, Kapitel 2, mit der Kernhärte als Berechnungseingangswert: 0,60

Errechnete Sicherheit durch FEMFAT, 3D FE- Modell, Elementtyp Tetraeder C3D10: 0,49

14. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei dynamischer Belastung
und daraus abgeleitete Datenbankeinträge

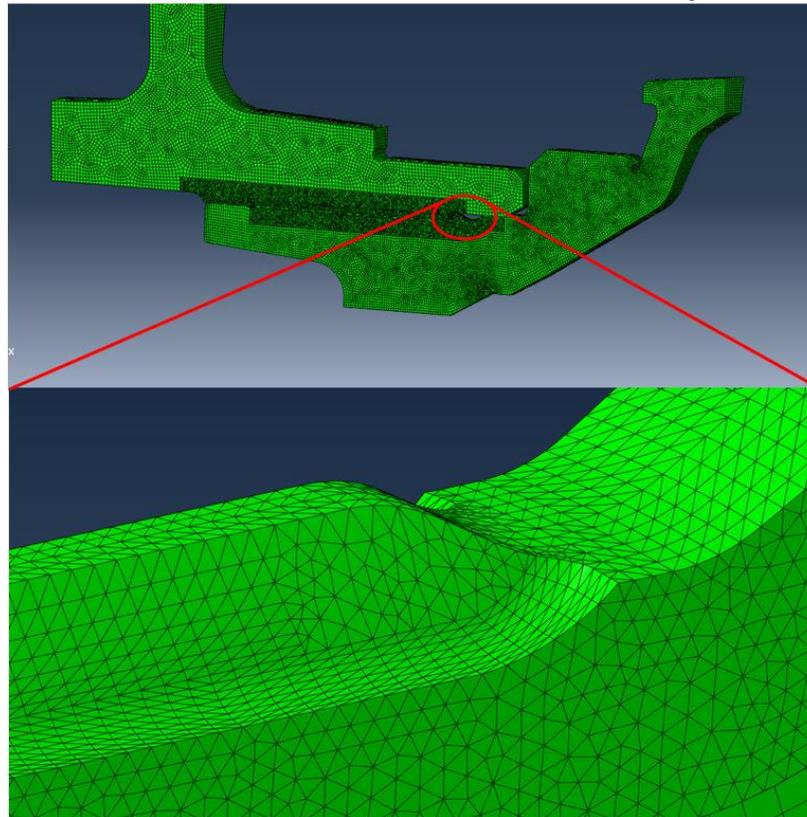


Abbildung 182: 463_69

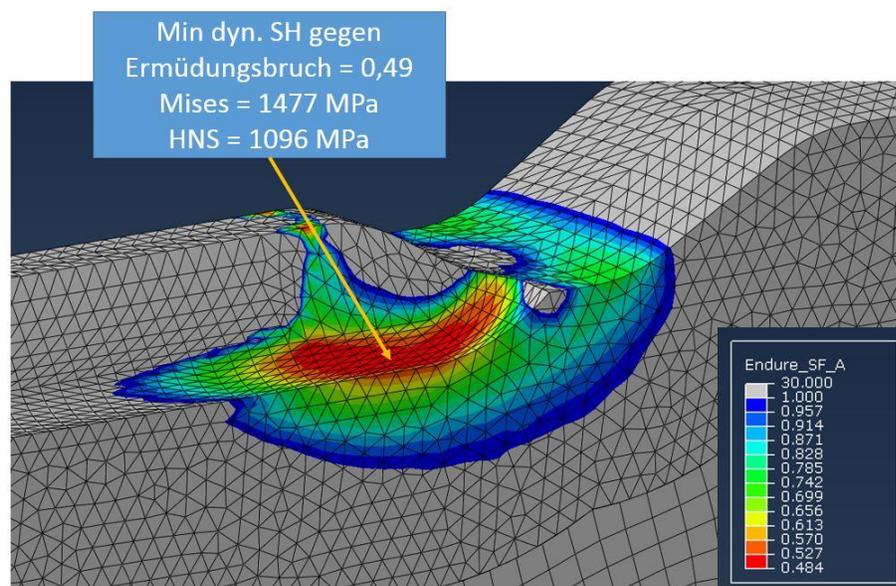


Abbildung 183: Errechnete Sicherheiten zu Nr. 463_69



Abbildung 184: Bruchbild zu Nr. 145



Abbildung 185: Bruchbild zu Nr. 145

14. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei dynamischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge

Diskussion der Ergebnisse

Grundsätzlich ergibt sich bei FE- Rechnungen bei den Steckverzahnungen ein ähnliches Phänomen bezüglich einer hohen Spannungskonzentration im Zahnfuß des Auslaufs wie bei den statischen Erprobungen. Da die Belastungsamplituden bei dynamischen Erprobungen aber geringer sind als bei den statischen, ist es betragsmäßig weit weniger stark ausgeprägt. Die Ergebnisse liegen möglicherweise dadurch größtenteils näher am Versuch.

Bemerkenswert ist, dass eine Berechnung mittels Nennspannungskonzepts nach Kapitel 5.5 Berechnungsergebnisse liefert, die grundsätzlich auch nahe am Versuch liegen.

Die nachfolgende Abbildung zeigt in ähnlicher Art und Weise wie die Gegenüberstellungen davor die errechneten Sicherheiten der einzelnen Berechnungsmethoden gegenüber dem Versuch. Rote Punkte stellen die minimale errechnete Sicherheit nach FE- Rechnung und FEMFAT- Auswertung dar. In blau werden die errechneten Sicherheiten bei konventioneller Berechnung nach KISSsoft dargestellt. Wie oben erläutert, kommt in diesem Diagramm eine dritte Punktemenge in Gelb dazu. Sie stellt die Ergebnisse nach neuer Methode durch KISSsoft in Anlehnung an die FKM Richtlinie, Kapitel 5.5, dar.

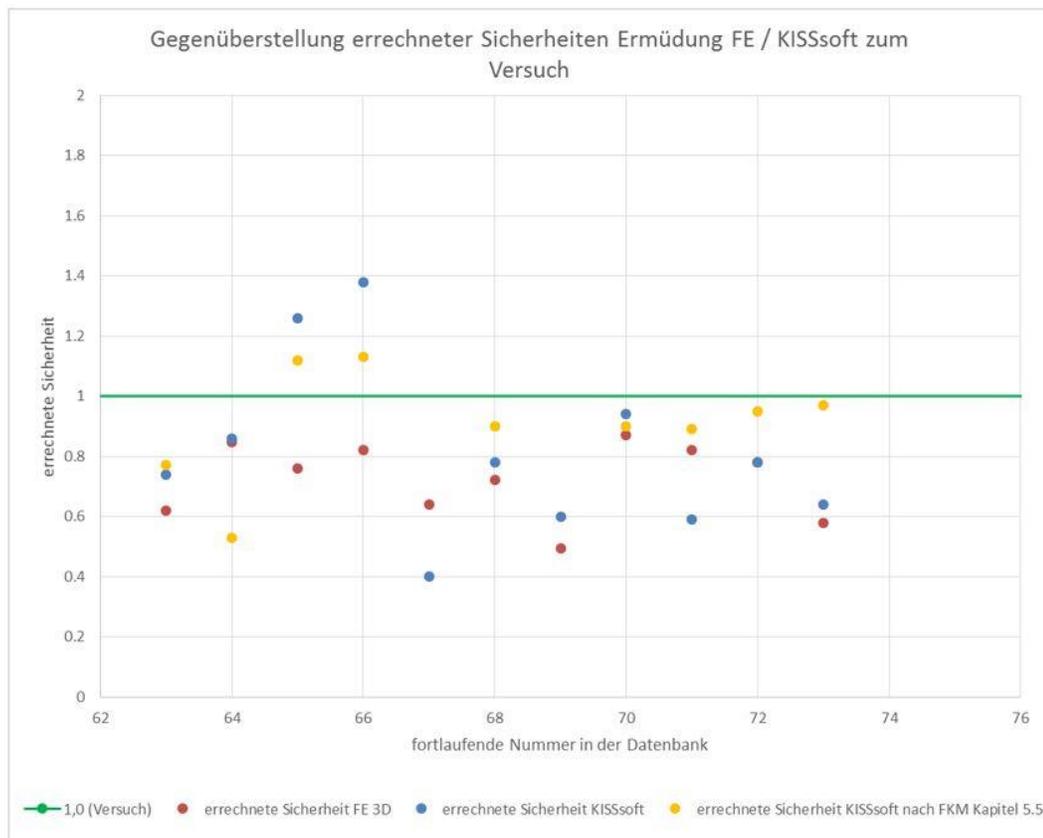


Abbildung 186: Gegenüberstellung errechneter Sicherheiten zum Versuch

14. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei dynamischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge

Bei Berechnung nach FKM Richtlinie und Nennspannungskonzept ist wieder eine ähnliche Problematik bezüglich der Aufwertung randschichtverfestigter Bauteile wie bei den statischen Erprobungen bemerkbar. Die Richtlinie gibt in Tabelle 2.3.8 Vorschläge für Faktoren, die die Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit durch die Härtung der Randschicht berücksichtigen sollen. Dabei wird zwischen gekerbten und nichtgekerbten Bauteilen bzw. Querschnitten unterschieden. Ähnlich wie bei den statischen Berechnungen erfolgt aber keine Unterscheidung bezüglich dem Verhältnis zwischen Oberflächenhärte und Kernhärte. So handelt es sich bei Datenbankeintrag Nummer 67 wieder um ein Bauteil aus C45E, welches an der Randschicht induktionsgehärtet wurde. Das hohe Verhältnis zwischen der Kernfestigkeit von aus der Härtemessung umgewertet 698 MPa und der Oberflächenfestigkeit von 2340 MPa wird durch den Faktor 1,2 den KISSoft hier vergibt, nur unzureichend abgebildet.

Tabelle 2.3.8 Randschichtfaktor K_V , Richtwerte ^{†1 †2}

Verfahren	nicht gekerbte Bauteile ^{†3}	gekerbte Bauteile
Stahl		
<i>Chemisch-thermische Verfahren</i>		
Nitrieren Härtetiefe 0,1 ... 0,4 mm, Oberflächenhärte 700 ... 1000 HV 10	1,10 – 1,15 (1,15 – 1,25)	1,30 – 2,00 (1,90 – 3,00)
Einsatzhärten Härtetiefe 0,2 ... 0,8 mm, Oberflächenhärte 670 bis 750 HV 10	1,10 – 1,50 (1,20 – 2,00)	1,20 – 2,00 (1,50 – 2,50)
Karbonitrierhärten Härtetiefe 0,2 ... 0,4 mm, Oberflächenhärte min. 670 HV 10	(1,80)	
<i>Mechanische Verfahren</i>		
Festwalzen	1,10 – 1,25 (1,20 – 1,40)	1,30 – 1,80 (1,50 – 2,20)
Kugelstrahlen	1,10 – 1,20 (1,10 – 1,30)	1,10 – 1,50 (1,40 – 2,50)
<i>Thermische Verfahren</i>		
Induktivhärten Flammhärten Härtetiefe 0,9 ... 1,5 mm, Oberflächenhärte 51 bis 64 HRC	1,20 – 1,50 (1,30 – 1,60)	1,50 – 2,50 (1,60 – 2,80)
Eisengusswerkstoff		
Nitrieren	1,10 (1,15)	1,3 (1,9)
Einsatzhärten	1,1 (1,2)	1,2 (1,5)
Festwalzen	1,1 (1,2)	1,3 (1,5)
Kugelstrahlen	1,1 (1,1)	1,1 (1,4)
Induktivhärten, Flammhärten	1,2 (1,3)	1,5 (1,6)

^{†1} Richtwerte für Bauteile, auch für weitere Verfahren, siehe auch FVA-Arbeitsblatt „Schwingfestigkeitssteigerung“.

^{†2} Die Richtwerte gelten für die *Bauteil-Dauerfestigkeit*. Für die *Bauteil-Betriebsfestigkeit* sind die Werte in der Regel niedriger. Die Werte gelten für 30 bis 40 mm Probendurchmesser; Klammernwerte für 8 bis 15 mm Probendurchmesser.

^{†3} Für nicht gekerbte und schwach gekerbte Bauteile.

14. Quantifizierung der Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei dynamischer Belastung und daraus abgeleitete Datenbankeinträge

Nicht unerwähnt bleiben sollte das Ergebnis der Versuchsnachrechnung einer dynamischen Erprobung, bei der die Bruchstelle ausnahmsweise nicht direkt von der Steckverzahnung ausging, sondern von einem umlaufenden Einstich zwischen zwei Steckverzahnungen. In diesem Fall passen die Ergebnisse zwischen FE- Rechnung und Versuch sehr gut- überein. Eine mögliche Begründung wäre, dass es sich hierbei wieder nicht um eine stark lokal begrenzte Spannungsüberhöhung handelt, sondern einen über den Umfang umlaufenden Bereich, bei dem sich auch schon bei den statischen Erprobungen bessere Übereinstimmungen zwischen FE- Rechnung und Versuch ergeben haben. Die genauen Daten hierzu sind unter den Nachrechnungen zu Datenbankeintrag Nr. 156_145 zu finden.

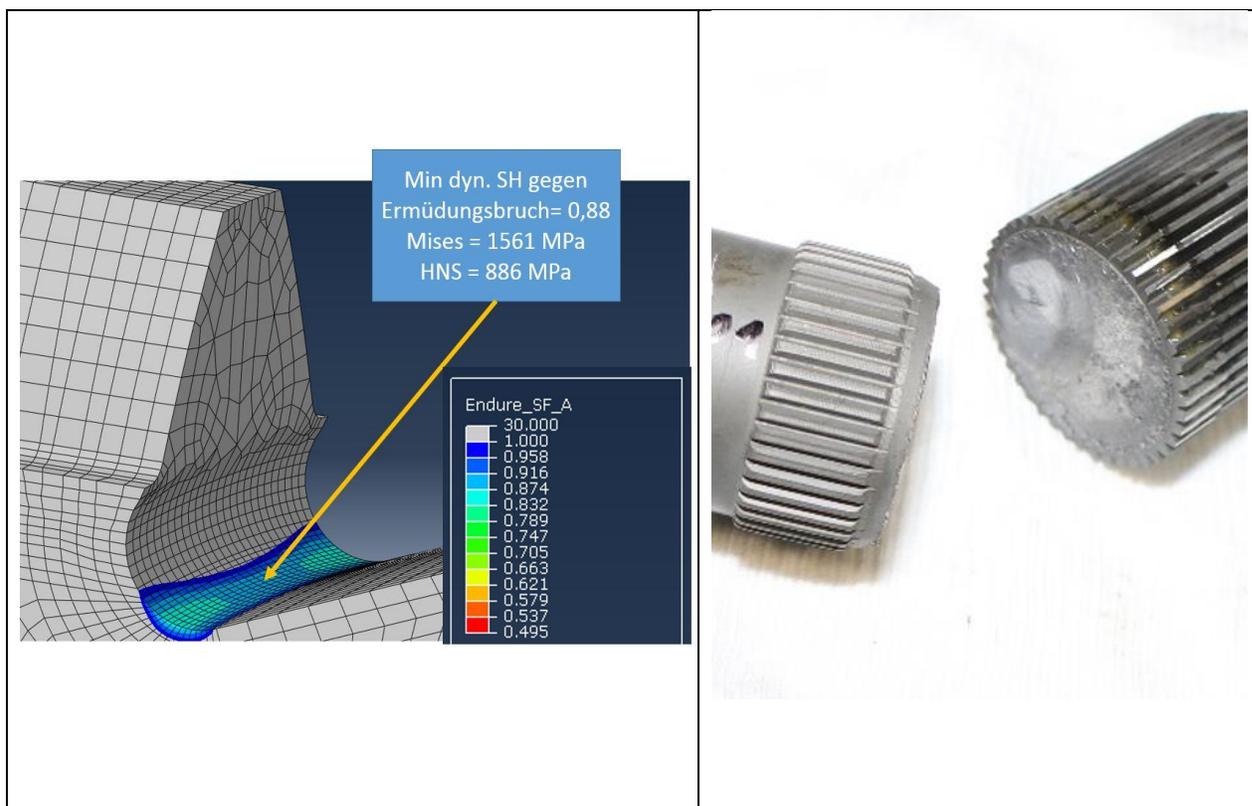


Abbildung 188: Gute Übereinstimmung zwischen Versuch und FE- Berechnung

15. Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei rotationssymmetrischen Kerben unter statischer Belastung haben sich als praktisch nicht vorhanden herausgestellt. Sind tatsächliche Werkstoff-Istwerte verfügbar, so wurden vor allem mit FE- Rechnungen sehr gute- Übereinstimmungen gefunden. Bei der Bewertung mittels Nennspannungskonzepts wurde bei niedrigfesten Kernwerkstoffen mit verhältnismäßig dazu hohen Oberflächenhärten höhere Abweichungen ermittelt, was sich aus der Vorgangsweise der pauschalen Aufwertung, unabhängig von diesem Verhältnis, ergibt. Die hierdurch entstehenden Abweichungen führen bei der Auslegung aber jedenfalls auf die konservative Seite. Aufgepasst werden sollte bei den diskutierten Fällen wie unzureichende Härtung im Nutgrund oder Initialrisse an der weichen Innenkontur durch Werkzeugkanten.

Problem bei den Steckverzahnungen unter statischer Belastung ist in der FE- Rechnung die lokal sehr hohe Spannungsüberhöhung im Zahnfuß kurz nach Ende des Eingriffs mit der Gegenverzahnung. Hierbei wird bei der FE- Rechnung die statische Festigkeit im Vergleich zur Bauteilerprobung an den kleinen entstehenden Flecken hoher Spannungsüberhöhung unterschätzt. Die Ergebnisse durch das Nennspannungskonzept liegen hier grundsätzlich näher am Versuch.

Bei dynamischen Erprobungen streuen die Differenzen zwischen Berechnung und Versuch beim konventionellen Festigkeitsnachweis mittels Nennspannungen in Anlehnung an die FKM Richtlinie, Kapitel 2, hoch. Die Berechnungsergebnisse durch FE- Rechnungen liegen hier etwas näher am Versuch und zeigen weniger die Tendenz, das eine mal sehr konservativ zu sein, bei einem anderen Bauteil zu optimistisch (welche beim Nennspannungskonzept öfter beobachtet werden konnte). Die meistens beste Übereinstimmung zwischen Versuch und Berechnung ergibt sich hier beim Nennspannungsnachweis in Anlehnung an die FKM Richtlinie und Modifizierung nach Kapitel 5.5. Allerdings ergeben sich hierbei unrealistisch niedrige Sicherheiten, sobald nicht Steckverzahnungen, sondern andere, gewöhnliche umlaufende Kerben wie Wellenabsätze betrachtet werden. Ist die kritische Stelle keine Steckverzahnung, an der die diskutierte Spannungsüberhöhung im Zahnfuß auftritt, so scheint eine Festigkeitsrechnung mittels FE-Modell und FEMFAT- Auswertung die grundsätzlich beste Übereinstimmungen mit dem Versuch zu ergeben.

16. Aus den Abgleichen abgeleitete Empfehlungen für das Vorgehen bei zukünftigen Berechnungen

Für rotationssymmetrische Kerben unter statischer Belastung haben sich 2D- FE- Modelle und anschließender Auswertung in FEMFAT als die beste Wahl bezüglich ihrer Übereinstimmung mit dem Versuch herausgestellt. Diese sind kein wirklicher Mehraufwand im Gegensatz zur Erstellung von KISSsoft Berechnungsmodellen und könnten somit in Zukunft weiter eingesetzt werden. Besonders durch die automatisierte Erstellung durch Skriptlösungen könnten schnelle Bewertungen effizient erfolgen.

Bei Auslegungen sollte verstärkt die spätere Fertigung berücksichtigt werden. Dies gestaltet sich beispielsweise bezüglich zu erwartender Einhärtetiefen in Kerbstellen als wichtig. Nutgründe könnten unzureichend gehärtet werden, bei Wellenabsätzen ist die Einhärtetiefe im 45° Winkel, nahe der höchsten Spannungskonzentration, oft abgeflacht, was ebenfalls in Betracht gezogen werden sollte.

Ist die Kernhärte verhältnismäßig sehr gering im Gegensatz zur Oberflächenhärte, werden bei Bewertung mittels Nennspannungskonzept nach derzeitiger Methodik verhältnismäßig konservative Ergebnisse erzielt. Das kann bei zukünftigen Auslegungen im Hinterkopf behalten werden, oder die gewählten Aufwertefaktoren werden entsprechend diesem Verhältnis etwas höher angesetzt.

Bei Steckverzahnungen sollte grundsätzlich die zyklische Symmetrie im Modellaufbau ausgenutzt werden, um die Elementierung dafür umso feiner gestalten zu können und die Rundungsradien im Zahngrund gut erfassen zu können. Außerdem verkürzt sich die Rechenzeit hierdurch enorm. Bei Bewertung mittels 3D- FE- Modell und FEMFAT- Auswertung kann beachtet werden, dass die ermittelten Ergebnisse an der kritischen Stelle hier konservativ ausfallen. Eine Einführung der durchgeführten Unterteilung der Randschicht in mehrere Schichten für unterschiedliche Festigkeitszuweisungen in der FEMFAT Auswertung scheint bei den linear- elastischen FE- Rechnungen für zukünftige Entwicklungsprojekte, besonders bei oft schnell geforderten Konzeptbewertungen, den Aufwand nicht widerzuspiegeln. Zwar kommt es bei manchen Rechnungen vor, dass in der obersten Elementreihe, der im abrupten Übergang ab der gemessenen Einhärtetiefe die Kernhärte zugeordnet wurde, die errechnete Sicherheit um wenige Hundertstel geringer ist als an der Oberfläche. Allerdings entspricht die Modellannahme, dass ab der Einhärtetiefe abrupt bereits die Kernhärte vorliegt, nicht ganz der Realität. Zwar sinkt diese, vor allem bei induktionsgehärteten Bauteilen sehr wohl schnell stark ab, die Kernhärte ist aber trotzdem dann erst frühestens nach einem oder ein paar zehntel Millimetern erreicht, wo die errechnete Sicherheit trotz Zuordnung der Kernfestigkeit wieder höher liegt als an der Oberfläche.

Effizienteste Möglichkeit sollte es sein, die im Rahmen dieser Arbeit angefallene Datenbank für zukünftige Auslegungen zu nutzen. Bei Abweichungen von bereits vorhandenen Einträgen könnten die Einträge unter Berücksichtigung des Widerstandsmoments für kleine Abweichungen vom ursprünglichen Eintrag skaliert werden.

Für Auslegungen bezüglich Ermüdungsfestigkeit scheint die Berechnung mittels FE- Modells und FEMFAT- Auswertung die sinnvollste Methode zu sein, weil ihre Abweichungen zu Versuchsergebnissen am wenigsten streuen. Besonders, wenn es sich bei der betrachteten Kerbstelle nicht um eine Steckverzahnung handelt. In weiterer Zukunft könnte auch über die neu implementierte Bewertung in KISSsoft in Anlehnung an Kapitel 5.5 der FKM Richtlinie in Betracht gezogen werden. Das sollte allerdings mit Vorsicht getan werden, da die Methode erst neu implementiert wurde und möglicherweise noch nicht endgültig ist. Hier sollte jedenfalls noch geklärt werden, weshalb sich die niedrigen errechneten Sicherheiten bei nicht- Steckverzahnungen, etwa Wellenabsätzen, ergeben.

Effizienteste Lösung sollte auch hier entweder eine direkte Nutzung oder die Skalierung bereits vorhandener, in die Datenbank eingetragene Versuchsergebnisse sein. Dabei sollte allerdings ebenfalls auf den Gebrauch ähnlicher Werkzeuge und Fertigungsverfahren wie bei den ursprünglichen Teilen beachtet werden, um möglichst wenig Abweichungen bezüglich ertragbarer Belastungen zu schaffen.

17. Vorschläge für weitere Erarbeitungen auf diesem Gebiet

Für die Anwendung angenehm, allerdings wahrscheinlich weniger geeignet für wissenschaftliche Erarbeitungen betrifft die durch Skripte automatisierte Erstellung von FE- Modellen. Bei rotationssymmetrischen Kerben unter statischer Belastung gestalteten sich die Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung bei Berechnung mittels 2D- FE- Modells als so gering, dass bezüglich der Methodik kein Bedarf an wesentlichen Verbesserungen zur Methodik gegeben zu sein scheint. Allerdings könnten Skriptlösungen für die automatisierte, effiziente Erstellung von Modellen und deren anschließenden Bewertung besonders bei Standardkerben, welche immer wieder vorkommen werden, weiter ausgebaut werden.

Vor allem beim statischen Festigkeitsnachweis mittels 3D- FE- Modellen und anschließender FEMFAT- Auswertung könnte über die Erarbeitung einer Modifizierung der zugrundeliegenden Materialgesetze nachgedacht werden. Durch linear- elastische Rechnungen ergeben sich lokal beschränkt so hohe Spannungen, dass diese nicht mehr sinnvoll durch einen örtlichen Nachweis in Anlehnung an die FKM Richtlinie bzw. FEMFAT bewertet werden können. Durch elasto- plastische Materialmodelle könnte die Stützwirkung der unteren Schichten möglicherweise besser abgebildet werden und durch die sich daraus ergebende Spannungsverteilung eine Bewertungsmethodik geschaffen werden, die näher an der Ergebnissen des Versuchs liegt. Ein erneuter Abgleich mit Versuchsergebnissen oder eine Gegenüberstellung der Ergebnisse linear elastischer Rechnungen und den Ergebnissen elasto- plastischer Rechnungen könnte hierüber Klarheit schaffen.

Auffällig bei der Auswertung von dynamischen Erprobungen war eine hohe Bandbreite an ermittelten Wöhlerlinien. Diese reichten von Werten zwischen 4 bis hin zu 17, obwohl allen eine reine Belastung auf Torsion und eine ähnliche Kerbform gemeinsam war. Für das Verständnis dieser Tatsache könnte erarbeitet werden, erstens wodurch die unterschiedlichen Steigungen zustande kommen und zweitens wodurch diese beeinflusst werden, um sie bei zukünftigen Auslegungen möglicherweise bereits im Vorhinein berücksichtigen zu können.

Des Weiteren würde es sich sicherlich als sinnvoll erweisen, die erstellte Datenbank der Versuchsergebnisse weiterzuführen und zu pflegen. Vor allem im Hinblick auf zukünftige Auslegungen wird sie sich sicherlich bezahlt machen. Steigerung davon wäre eine gemeinsame Datenbank mehrerer Unternehmensstandorte mit Prüfstands- und Entwicklungsbetrieb. Hierbei müsste allerdings ein standardisiertes Verfahren zur Eintragung von Daten oder hierfür notwendigen Tools erarbeitet werden, um die Datenbank nicht unübersichtlich werden zu lassen, was sich durch die Benutzung und Eintragung von Daten durch viele Benutzer als Gefahr ergeben würde.

Verwendete Abkürzungen

CHD	Case Hardening Depth
EHT	Einhärtetiefe
HBW	Brinellhärte
HNS	Hauptnormalspannung
HRC	Rockwellhärte
HV	Vickershärte
KHT	Kernhärte
MPT	Magna Powertrain
OFH	Oberflächenhärte
RS	Randschicht
SH	Sicherheit
Endure_SF_A	FEMFAT- Bezeichnung für errechneten Sicherheitsfaktor gegen Ermüdungsbruch
Stat_SF_A	FEMFAT- Bezeichnung für errechnete Sicherheit gegen statische Maximallast

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Typische umlaufende Kerben an Getriebewellen, entnommen aus [1] und [10]	5
Abbildung 2: Steckverzahnung	6
Abbildung 3: Schmierungsbohrung	6
Abbildung 4: Nicht- rotationssymmetrische, unter Umständen aber zyklisch symmetrische Kerbformen ..	6
Abbildung 5: Beispiel eines KISSsoft Modells einer Getriebewelle	9
<i>Abbildung 6: Prüfaufbau schematisch</i>	12
Abbildung 7: Prüfaufbau Detail	13
Abbildung 8: Versuchsergebnisse und Wöhlerlinie	15
Abbildung 9: Eindeutige Zuordnung einer Kerbe zum Bruch, hier ein umlaufender Einstich zwischen zwei Steckverzahnungen	16
Abbildung 10: Beispiel des Ergebnisses einer Magnetpulverprüfung mit fluoreszierenden Zusätzen	17
Abbildung 11: Modellaufbau FE 2D	22
<i>Abbildung 12: Modellaufbau zu Nr. 103</i>	25
Abbildung 13: Spannungen zu Nr. 103	25
Abbildung 14: Errechnete Sicherheiten zu Nr. 103	26
Abbildung 15: Bruchbilder zu Nr. 103	26
Abbildung 16: Schliffbild zu Nr. 103	27
Abbildung 17: Moment / Verdrehwinkeldiagramm zu Nr. 103	27
Abbildung 18: Modellaufbau zu Nr.105	29
Abbildung 19: Spannungen zu Nr. 105	30
Abbildung 20: Errechnete Sicherheiten zu Nr. 105	30
Abbildung 21: Modellaufbau zu Nr.106	31
Abbildung 22: Spannungen zu Nr. 106	32
Abbildung 23: Errechnete Sicherheiten zu Nr. 106	32
Abbildung 24: Moment / Verdrehwinkeldiagramm zu Nr. 106	33
Abbildung 25: Bruchbilder zu Nr. 106	34
Abbildung 26: Modellaufbau Nr. 113	35
Abbildung 27: Spannungen Nr. 113	36
Abbildung 28: Errechnete Sicherheiten Nr. 113	36
Abbildung 29: Bruchbilder zu Nr. 113	36
Abbildung 30: Moment / Verdrehwinkeldiagramm zu Nr. 113	37
Abbildung 31: Modellaufbau Nr. 124	38
Abbildung 32: Spannungen Nr. 124	39
Abbildung 33: Errechnete Sicherheiten Nr. 124	39
Abbildung 34: Moment / Verdrehwinkeldiagramm zu Nr. 124	40
Abbildung 35: Bruchbild zu Nr. 124	40
Abbildung 36: Bruchbilder zu Nr. 124	41
Abbildung 37: Modellaufbau zu Nr. 129	42
Abbildung 38: Spannungen zu Nr. 129	43
Abbildung 39: Errechnete Sicherheiten zu Nr. 129	43

Abbildung 40: Moment / Verdrehwinkeldiagramm zu Nr. 129.....	44
Abbildung 41: Bruchbild zu Nr. 129.....	44
Abbildung 42: Bruchbilder zu Nr. 129	45
Abbildung 43: Modellaufbau zu Nr. 136	46
Abbildung 44: Spannungen zu Nr. 136	47
Abbildung 45: Errechnete Sicherheiten zu Nr. 136	47
Abbildung 46: Moment / Verdrehwinkeldiagramm zu Nr. 136.....	48
Abbildung 47: Bruchbilder zu Nr. 136	48
Abbildung 48: Modellaufbau zu Nr. 137.....	50
Abbildung 49: Spannungen zu Nr. 137.....	50
Abbildung 50: Errechnete Sicherheiten zu Nr. 137	51
Abbildung 51: Moment / Verdrehwinkeldiagramm zu Nr. 137.....	51
Abbildung 52: Bruchbilder zu Nr. 137	52
Abbildung 53: Modellaufbau zu Nr. 138.....	53
Abbildung 54: Spannungen zu Nr. 138.....	54
Abbildung 55: Errechnete Sicherheiten zu Nr. 138	54
Abbildung 56: Moment / Verdrehwinkeldiagramm zu Nr. 138.....	55
Abbildung 57: Bruchbild zu Nr. 138.....	55
Abbildung 58: Gesamtergebnisse stat. SH rotationssymmetrischer Kerben	57
Abbildung 59: Induktionshärtung im Nutgrund	59
Abbildung 60: Induktionshärtung im Nutgrund	60
Abbildung 61: Induktionshärtung im Nutgrund	60
Abbildung 62: Rissverlauf	61
Abbildung 63: Steckverzahnung	62
Abbildung 64: Steckverzahnung im FE- Modell.....	63
Abbildung 65: Modellaufbau FE 3D.....	64
Abbildung 66: Modellaufbau zu Nr. 118_147.....	66
Abbildung 67: Modell zu Nr. 118_147.....	66
Abbildung 68: Spannungen zu Nr. 118_147	67
Abbildung 69: Moment / Verdrehwinkeldiagramm zu Nr. 118_147.....	67
Abbildung 70: Bruchbild zu Nr. 118_147.....	68
Abbildung 71: Modellaufbau zu Nr. 118_148.....	69
Abbildung 72: Spannungen zu Nr. 118_148	70
Abbildung 73: Errechnete Sicherheiten zu Nr. 118_148	70
Abbildung 74: Bruchbild zu Nr. 118_148.....	71
Abbildung 75: Moment / Verdrehwinkeldiagramm zu Nr. 118_148.....	71
Abbildung 76: Materialzuordnung in FEMFAT, Nr. 118_63.....	72
Abbildung 77: Modellaufbau zu Nr. 156_146 Hexaeder	73
Abbildung 78: Errechnete Sicherheiten zu Nr. 156_146 Hexaeder.....	74
Abbildung 79: Modellaufbau zu Nr. 156_146 Tetraeder.....	74
Abbildung 80: Errechnete Sicherheiten zu Nr. 156_146 Tetraeder	75
Abbildung 81: Moment / Verdrehwinkeldiagramm zu Nr. 156_146.....	75

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 82: Bruchbild zu Nr. 156_146	76
Abbildung 83: Materialzuordnung in FEMFAT, Nr. 156:146	76
Abbildung 84: Modellaufbau zu Nr. 241_104	78
Abbildung 85: Errechnete Sicherheiten zu Nr. 241_104	78
Abbildung 86: Moment / Verdrehwinkeldiagramm zu Nr. 241_104	79
Abbildung 87: Materialzuordnung in FEMFAT, Nr. 241_104	79
Abbildung 88: Modellaufbau zu Nr. 258_114	81
Abbildung 89: Errechnete Sicherheiten zu Nr. 258_114	81
Abbildung 90: Moment / Verdrehwinkeldiagramm zu Nr. 258_114	82
Abbildung 91: Bruchbild zu Nr. 258_114	82
Abbildung 92: Bruchbild zu Nr. 258_114	83
Abbildung 93: Modellaufbau zu Nr. 258_115	84
Abbildung 94: Errechnete Sicherheiten zu Nr. 258_115, farbig: errechnete Sicherheit kleiner 1.....	85
Abbildung 95: Bruchbild zu Nr. 258_115	85
Abbildung 96: Moment / Verdrehwinkeldiagramm zu Nr. 258_115	86
Abbildung 97: Modellaufbau zu Nr. 268_107 Hexaeder	87
Abbildung 98: Errechnete Sicherheiten zu Nr. 268_107 Hexaeder	88
Abbildung 99: Modellaufbau zu Nr. 268_107 Tetraeder	88
Abbildung 100: Errechnete Sicherheiten zu Nr. 268_107 Tetraeder	89
Abbildung 101: Moment / Verdrehwinkeldiagramm zu Nr. 268_107	89
Abbildung 102: Bruchbild zu Nr. 268_107	90
Abbildung 103: Materialzuordnung in FEMFAT, Nr. 268_107	90
Abbildung 104: Modellaufbau zu Nr. 363_108	92
Abbildung 105: Errechnete Sicherheiten zu Nr. 363_108.....	92
Abbildung 106: Errechnete Sicherheiten zu Nr. 363_108.....	93
Abbildung 107: Bruchbild zu Nr. 363_108	93
Abbildung 108: Bruchbild zu Nr. 363_108	94
Abbildung 109: Materialzuordnung in FEMFAT, Nr. 363_108	94
Abbildung 110: Bruchbild zu Nr. 363_108	95
Abbildung 111: Modellaufbau zu Nr. 463_149	96
Abbildung 112: Moment / Verdrehwinkeldiagramm zu Nr. 463_149	97
Abbildung 113: Errechnete Sicherheiten zu Nr. 463_149.....	97
Abbildung 114: Bruchbild zu Nr. 463_149	98
Abbildung 115: Bruchbild zu Nr. 463_149	98
Abbildung 116: Modellaufbau zu Nr. 145 Hexaeder.....	100
Abbildung 117: Errechnete Sicherheiten zu Nr. 145 Hexaeder	100
Abbildung 118: Modellaufbau zu Nr. 145 Tetraeder	101
Abbildung 119: Errechnete Sicherheiten zu Nr. 145 Tetraeder	101
Abbildung 120: Moment / Verdrehwinkeldiagramm zu Nr. 145	102
Abbildung 121: Materialzuordnung in FEMFAT, Nr. 145	102
Abbildung 122: Bruchbild zu Nr. 145	103
Abbildung 123: Steckverzahnung FE	104

Abbildung 124: Hauptnormalspannungen im Steckverzahnungsauslauf	105
Abbildung 125: Spannungsüberhöhung: Höhere Spannungen als 85% der Maximalspannung farbig.....	106
Abbildung 126: Errechnete Sicherheiten	107
Abbildung 127: Gegenüberstellung zum Moment / Verdrehwinkeldiagramm	107
Abbildung 128:Gegenüberstellung errechneter Sicherheiten zum Versuch.....	108
Abbildung 129: Modellaufbau zu Nr. 118_63	115
Abbildung 130: Errechnete Sicherheiten zu Nr. 118_63	116
Abbildung 131: Verlauf der Materialzuordnung zu Nr. 118_63	116
Abbildung 132: Bruchbild zu Nr. 118_63.....	117
Abbildung 133: Schliffbild zu Nr. 118_63	117
Abbildung 134: Modellaufbau zu Nr. 156_64 Hexaeder	119
Abbildung 135: Errechnete Sicherheiten zu Nr. 156_64 Hexaeder.....	120
Abbildung 136: Modellaufbau zu Nr. 156_64 Tetraeder.....	120
Abbildung 137: Errechnete Sicherheiten zu Nr. 156_64 Tetraeder	121
Abbildung 138: Bruchbild zu Nr. 156_64.....	121
Abbildung 139: Bruchbild zu Nr. 156_64.....	122
Abbildung 140: Verlauf der Materialzuordnung zu Nr. 156_64	122
Abbildung 141: Modellaufbau zu Nr. 202_65.....	124
Abbildung 142: Errechnete Sicherheiten zu Nr. 202_65	125
Abbildung 143: Verlauf der Materialzuordnung zu Nr. 202_65	125
Abbildung 144: Bruchbild zu Nr. 202_65.....	126
Abbildung 145: Schliff zu Nr. 202_65	126
Abbildung 146: Modellaufbau zu Nr. 224_66.....	128
Abbildung 147: Errechnete Sicherheiten zu Nr. 224_66	129
Abbildung 148: Verlauf der Materialzuordnung zu Nr. 224_66	129
Abbildung 149: Bruchbild zu Nr. 224_66.....	130
Abbildung 150: Modellaufbau zu Nr. 241_73.....	132
Abbildung 151: Errechnete Sicherheiten zu Nr. 241_73	132
Abbildung 152: Bruchbild zu Nr. 241_73.....	133
Abbildung 153: Bruchbild zu Nr. 241_73.....	133
Abbildung 154: Bruchbild zu Nr. 241_73.....	134
Abbildung 155: Verlauf der Materialzuordnung zu Nr. 241_73	134
Abbildung 156: Modellaufbau zu Nr. 258_71.....	136
Abbildung 157: Errechnete Sicherheiten zu Nr. 258_71	136
Abbildung 158: Bruchbild zu Nr. 258_71.....	137
Abbildung 159: Schliffbild zu Nr. 258_71	137
Abbildung 160: Schliffbild zu Nr. 258_71	137
Abbildung 161: Modellaufbau zu Nr. 258_72.....	139
Abbildung 162: Errechnete Sicherheiten zu Nr. 258_72	140
Abbildung 163: Bruchbild zu Nr. 258_72.....	140
Abbildung 164: Schliffbild zu Nr. 258_72	141
Abbildung 165: Modellaufbau zu Nr. 268_70.....	142

Abbildung 166: Errechnete Sicherheiten zu Nr. 268_70.....	143
Abbildung 167: Bruchbild zu Nr. 268_70	143
Abbildung 168: Schliffbild zu Nr. 268_70.....	144
Abbildung 169: Verlauf der Materialzuordnung zu Nr. 268_70.....	144
Abbildung 170: Modellaufbau zu Nr. 374_67	146
Abbildung 171: Errechnete Sicherheiten zu Nr. 374_67.....	147
Abbildung 172: Verlauf der Materialzuordnung zu Nr. 374_67.....	147
Abbildung 173: Bruchbild zu Nr. 374_67	148
Abbildung 174: Bruchbild zu Nr. 374_67	148
Abbildung 175: Schliffbild zu Nr. 374_67.....	149
Abbildung 176: Modellaufbau zu Nr. 461_68	151
Abbildung 177: Errechnete Sicherheiten zu Nr. 461_68.....	151
Abbildung 178: Verlauf der Materialzuordnung zu Nr. 461_68.....	152
Abbildung 179: Bruchbild zu Nr. 461_68	152
Abbildung 180: Bruchbild zu Nr. 461_68	153
Abbildung 181: Schliffbild zu Nr. 461_68.....	153
Abbildung 182: 463_69	155
Abbildung 183: Errechnete Sicherheiten zu Nr. 463_69.....	155
Abbildung 184: Bruchbild zu Nr. 145	156
Abbildung 185: Bruchbild zu Nr. 145	156
Abbildung 186: Gegenüberstellung errechneter Sicherheiten zum Versuch	157
Abbildung 187: Tabelle 2.3.8, FKM Richtlinie 2012 [1]	158
Abbildung 188: Gute Übereinstimmung zwischen Versuch und FE- Berechnung	159

Quellenangaben und Literaturverzeichnis

- [1] Forschungskuratorium Maschinenbau: Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile. 2012. Frankfurt / Main.
- [2] DIN EN ISO 18265. 2013. Metallische Werkstoffe- Umwertung von Härtewerten
- [3] KISSsoft AG. 2017. KISSsoft Release 03/2017 Benutzerhandbuch.
- [4] www.magna.com
- [5] www.femfat.magna.at
- [6] Dietmar Melzer. Maximal ertragbare Spannungsspitzen bei einsatzgehärteten Wellen und Achsen. 2003. Dresden.
- [7] Christian Buzzi. Betriebsfestigkeitssimulation von Getriebewellen. 2007. Graz.
- [8] Ali Daryusi. Beitrag zur Ermittlung der Kerbwirkung an Zahnwellen mit freiem und gebundenem Auslauf. 2009. Dresden.
- [8] Andreas Diemar. Simulation des Einsatzhärtens und Abschätzung der Dauerfestigkeit einsatzgehärteter Bauteile. 2007. Erfurt.
- [9] Christian Müller. Zur statistischen Auswertung experimenteller Wöhlerlinien. 2015. Clausthal.
- [10] Tobias Hertter. Rechnerischer Festigkeitsnachweis der Ermüdungstragfähigkeit vergüteter und einsatzgehärteter Stirnräder. 2003. München.
- [11] DIN 50100:1978-02. Schwingfestigkeitsversuch – Durchführung und Auswertung von zyklischen Versuchen mit konstanter Lastamplitude für metallische Werkstoffproben und Bauteile
- [12] Weiterentwicklung des statischen Festigkeitsnachweises. M. Vormwald, T. Seeger, C. Versch, D. Siegele, P. Leis. Berlin
- [13] DIN EN 10328. Eisen und Stahl. Bestimmung der Einhärtungstiefe nach dem Randschichthärten; Deutsche Fassung EN 10328:2005. Berlin.
- [14] DIN EN 13018. Zerstörungsfreie Prüfung – Sichtprüfung – Allgemeine Grundlagen; Deutsche Fassung EN 13018:2016. Berlin.
-

- [15] DIN EN ISO 2639. Bestimmung und Prüfung der Einsatzhärtungstiefe. 2003. Berlin.
- [16] DIN EN ISO 6506-1. Metallische Werkstoffe –Härteprüfung nach Brinell. 2015. Berlin.
- [17] DIN EN ISO 6507-1. Metallische Werkstoffe –Härteprüfung nach Vickers. 2006. Berlin.
- [18] DIN EN ISO 6508-1 Metallische Werkstoffe –Härteprüfung nach Rockwell. 2016. Berlin.
- [19] DIN EN 571-1: Eindringprüfung
- [20] Haibach. Betriebsfestigkeit. 2006. Wiesbaden
- [21] FEMFAT. FEMFAT Basic Manual. 2017. Steyr
- [22] Finney, J.M.; Mann, J.Y. Fatigue S/N data in relation to variability in predicted life. Proc. of a Symposium on Aircraft Structural Fatigue, Aeronautical Research Laboratories, Melbourne (1976).
-
-