

# Basisprogramme ENDBERICHT UND ENDABRECHNUNG



Ein **Endbericht mit Endabrechnung** ist am Ende des Förderungszeitraums (inkl. eventueller Verlängerung) zu erstellen und innerhalb von 3 Monaten via eCall zu übermitteln. Der Endbericht soll über die im **gesamten** Förderungszeitraum durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse berichten. Bei mehrjährigen Projekten ist nach jedem Förderungsabschnitt (meist ein Jahr) ein Endbericht mit Endabrechnung zu erstellen.

Ein Endbericht soll umfangreicher als ein Zwischenbericht sein und auch eine Bewertung der Ergebnisse beinhalten. Als grober Richtwert kann ein Umfang von ca. 10 DIN A4 Seiten angegeben werden.

<b>Projekttitle:</b>	<b>Litzenzuglieder mit erhöhter Dauerschwingfestigkeit</b>
<b>Projektnummer:</b>	834071
<b>Firmenname:</b>	ÖBV-GmbH
<b>Förderungszeitraum: (inkl. Genehmigter Verlängerung)</b>	01.06.2011 – 30.11.2012
<b>Verantwortliche Person für den fachlichen Teil</b>	Prof. Johann Kollegger / DI Wolfgang Träger / DI Johannes Novoszel
<b>Verantwortliche Person für die Abrechnung</b>	DI Michael Pauser

## Kostenzusammenfassung

Tabellenbefüllung per Doppelclick aktivieren!

	<b>Genehmigte Kosten</b>	<b>IST - Kosten</b>	<b>IST / genehmigt</b>
<b>Personalkosten</b>	<b>8.800</b>	<b>9.311</b>	106%
<b>F&amp;E-Infrastruktur - Nutzung</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	-
<b>Sach- und Materialkosten</b>	<b>32.500</b>	<b>57.730</b>	178%
<b>Leistungen Dritter</b>	<b>224.200</b>	<b>221.868</b>	99%
<b>Reisekosten</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	-
<b>Patentanmeldekosten</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	-
<b>Gesamt</b>	<b>265.500</b>	<b>288.909</b>	109%

## 1. Arbeiten und Termine

Beschreiben Sie (chronologisch) die im Förderungszeitraum durchgeführten Arbeiten. Vergleichen Sie den tatsächlichen Ablauf mit dem eingereichten Arbeits- und Terminplan. Beschreiben Sie Änderungen im Ablauf und in der Zielsetzung und beschreiben Sie die Ursachen für diese Änderungen.

Juni bis September 2011

In diesem Zeitraum wurde aufbauend auf den Versuchsergebnissen des ersten Forschungsjahres ein passendes Versuchsprogramm zusammengestellt. Es gab mehrere Treffen mit den Projektpartnern, um alle Versuchsdetails abklären zu können. Da das vorhandene Forschungsprojekt durch sehr kosten- bzw. zeitintensive experimentelle und numerische Untersuchungen gekennzeichnet ist, wurde mit der Fertigung der Verankerungskomponenten auf eine Genehmigung des Fortsetzungsantrags gewartet, da die finanziellen Mittel der Infrastrukturbetreiber bzw. der Unternehmen auf dem Gebiet der Vorspanntechnik nicht ausreichen würden, um die notwendige Mindestanzahl an experimentellen Untersuchungen, auch ohne Förderung durch die FFG, durchführen zu können.

Finite Elemente Analysen (FEA) wurden begleitend zu den experimentellen Untersuchungen durchgeführt, um Spannungs- und Verzerrungszustände in den Verankerungsbereichen, Bündelungen und den freien Längen der Spannkabel zu berechnen, sowie den Einfluss der Lastzyklen während einer Ermüdungsbeanspruchung festzustellen. Aufgrund der komplexen Nichtlinearität gestaltete sich dieser numerische Teil des Forschungsvorhabens zu einem vielschichtigen Bestandteil. Die ausgeprägte Nichtlinearität besteht, neben den elasto-plastischen Materialeigenschaften und der dynamischen Dauerbelastung in Form einer sinusförmigen Kraftamplitude, aufgrund der komplexen Interaktionen zwischen den Spanndrahtlitzen, und den einsatzgehärteten Stahlkeilen innerhalb der Verankerungskörper. Die dazu erforderliche Multiskalenmodellierung beinhaltet ein breites Spektrum an Dimensionen, angefangen von den Systemkomponenten im Zentimeterbereich bis hin zum Mikrometerbereich kritischer Reibkontaktinteraktionen, welche zwischen Stahlklemmkeilen und Litzenzuggliedern infolge von Fretting- (Reibkorrosion) und Fretting-Fatigue- Phänomenen (Reibermüdung) auftreten.

Oktober bis November 2012

Nach Bekanntwerden der Genehmigung des Fortsetzungsantrags wurden alle Verankerungskomponenten für die ersten Versuchserien gefertigt und an die TU Wien geliefert. Die Versuchseinrichtung wurde an die bevorstehenden Versuche angepasst.

Dezember bis Februar 2012

In diesem Zeitraum wurden zwei Dauerschwingversuche mit einer Prüffrequenz von 19 Hz über 2 bzw. 10 Millionen Lastwechsel mit anschließendem statischem Bruchversuch an 19-litzigen Schrägkabelsystemen mit einer Oberlast von 45% GUTS und einer Schwingbreite von 250 MPa durchgeführt. Aus versuchstechnischen Gründen (erneute Anpassung der Versuchsanlage) wurden jene Versuche vorgezogen, welche eigentlich für den Abschluss des Forschungsprojekts vorgesehen waren.

März bis April 2012

Im März 2012 wurde der erste von zwei sogenannten „Runoutversuchen“ an einem 19-litzigen Schrägkabelsystem durchgeführt. Bei diesen Versuchen wurde gezielt das Auftreten von Drahtbrüchen während des Dauerschwingversuchs untersucht. Das Ziel war es, den Versuch erst bei einem Versagen von mehr als 40% des Drahtquerschnitts bzw. nach Erreichen von 50 Millionen Lastwechseln zu stoppen. Dadurch sollte speziell das Langzeitermüdungsverhalten von Litzenzuggliedern untersucht werden um dadurch Aufschluss über die fortschreitende Schädigung von Schrägseilsystemen zu erhalten. Der erste Versuch wurde nach den Versuchsparametern für Schrägkabelsysteme mit einer Schwingbreite von 200 MPa und einer Oberlast von 45 % GUTS durchgeführt. Durch eine Abänderung der Prüfmaschine konnte für 19-litzige Schrägkabelsysteme eine Erhöhung der Prüffrequenz von 19 Hz auf 29 Hz erreicht werden.

Mai bis Juni 2012

Nach Beendigung des ersten „Runoutversuchs“ wurde der zweite „Runoutversuch“ ebenfalls an einem 19-litzigen Kabel durchgeführt, wobei dieses Mal die Oberlast 55 % GUTS und die Schwingbreite 140 MPa betrug. Diese Versuchsparameter wurden an sogenannte „Extradosed Bridges“ angepasst, bei denen die Litzenzugglieder nicht innerhalb sondern außerhalb der Hohlkastenquerschnitte verlaufen und so das Tragverhalten von Schrägkabelbrücken und Balkenbrücken vereinen. Die Hauptbelastung der Litzenzugglieder in solchen Konstruktionen ist auf die ständig wirkenden Lasten des Brückenquerschnitts zurückzuführen.

Juli bis September 2012

Im Anschluss an die beiden „Runoutversuche“ wurden 25 Versuche an Monolithensystemen mit unterschiedlichen Versuchsparametern durchgeführt. Der schnelle und unkomplizierte Einbau dieser Versuche ermöglichte eine große Anzahl an Versuchen, die notwendig waren, um die Ergebnisse des ersten Forschungsjahrs zu bestätigen. Es wurde der Einfluss von Prüffrequenz, Schwingbreite, Oberlast und Lastwechselzahl nochmals näher untersucht.

Oktober bis November 2012

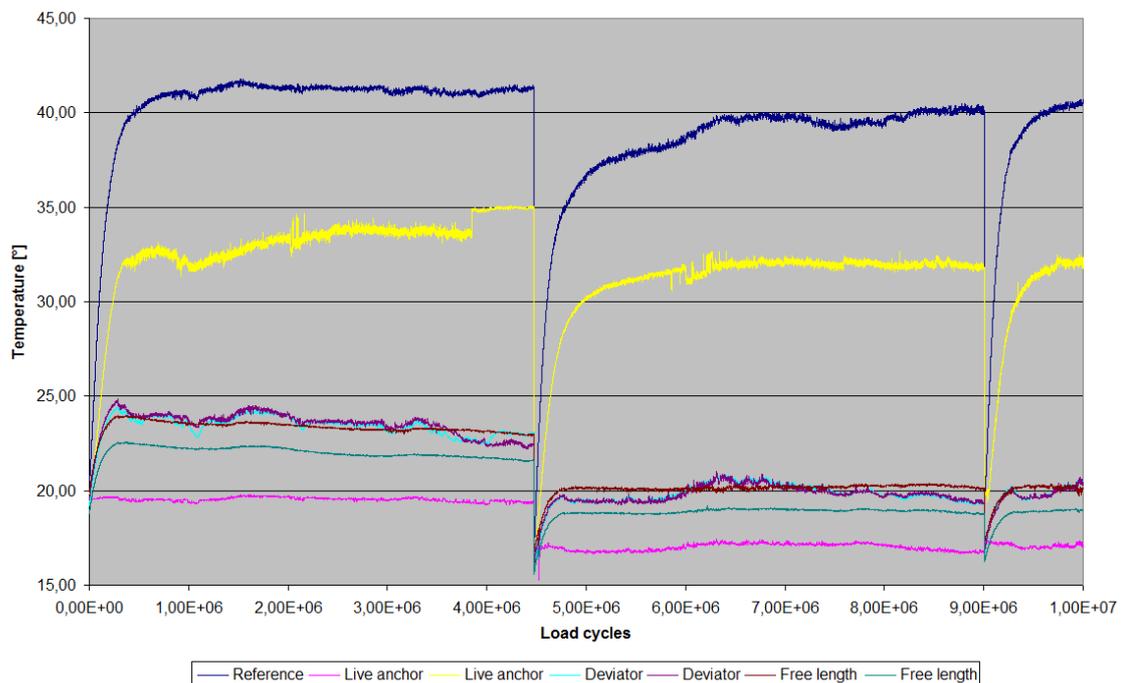
Den Abschluss bildeten 2 Schrägkabelversuche an 12-litzigen Systemen bei denen der Einfluss der Oberlast auf das Ermüdungsverhalten der Litzenzugglieder untersucht wurde. Beide Ermüdungsversuche über zwei Millionen Lastwechsel wurden mit einer Oberlast von 60% GUTS und einer Schwingbreite von 160 MPa durchgeführt. Ebenfalls in diesem Zeitraum wurde der Endbericht verfasst.

## 2. Ergebnisse - welche Ziele/Meilensteine wurden erreicht?

Beschreiben Sie die erreichten Ergebnisse. Führen Sie erzielte Leistungsdaten an. Fügen Sie exemplarisch Fotos, Zeichnungen, Diagramme, Versuchsauswertungen, Schemas von Prototypen und Versuchsaufbauten etc. ein. Dieser Teil kann durchaus in Punkt 1. integriert werden – vor allem dann, wenn jedes Arbeitskapitel seine eigenen Ergebnisse hat.

### Experimentelle Untersuchungen

Bei den ersten beiden Versuchen des zweiten Forschungsjahrs wurden 19-litzige Schrägkabelsysteme mit einer erhöhten Schwingbreite und unterschiedlichen Lastwechselzahlen getestet. Trotz einer Erhöhung der Schwingbreite auf 250 MPa konnten weder über 2 Millionen noch über 10 Millionen Lastwechsel Drahtbrüche während der Dauerschwingversuche festgestellt werden. Bei den im Anschluss an die Ermüdungsversuche durchgeführten statischen Bruchversuchen wurden die Ergebnisse aus dem ersten Forschungsjahr bestätigt. Es war so gut wie kein Einfluss der Lastwechselzahl (bis 10 Millionen) am statischen Bruchverhalten von Schrägkabeln feststellbar. Während des Ermüdungsversuchs konnte eine Erwärmung der Verankerung auf bis zu 40°C festgestellt werden. Die Messungen an den Litzen in freier Länge ergaben eine Steigerung der Temperatur auf etwa 25°C. Ein Temperaturverlauf über 10 Million Lastwechsel ist in Abb. 1 ersichtlich.

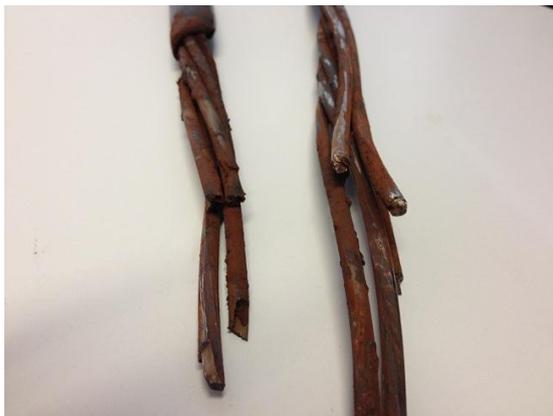


**Abb.1: Temperaturverlauf während eines Dauerschwingversuchs über 10 Millionen Lastwechsel**

Beim ersten der beiden Langzeitversuche an 19-litzigen Schrägkabelsystemen über 50 Millionen Lastwechsel mit einer Oberlast von 45% GUTS und einer Schwingbreite von 200 MPa konnten während des Dauerschwingversuchs acht Drahtbrüche festgestellt werden, wobei sieben Brüche an einer Litze auftraten. Dies ist auf das Phänomen der Reibermüdung zurückzuführen, wo die Bruchstelle eines Drahtes die umgebenden Drähte dermaßen schädigt, dass diese bei einer weiteren zyklischen Belastung ebenfalls versagen, siehe Abbildung 2. Der große Vorteil von parallel geführten

Litzenbündeln ist jener, dass es zu keiner progressiven Schädigung des Gesamtsystems kommen kann. Durch die PE Ummantelung jeder einzeln verankerten Litze wird eine fortschreitende Schädigung des Kabelquerschnitts zufolge Reibermüdung verhindert. Der Langzeitermüdungsversuch zeigte, dass es im schlimmsten Fall zu einem Ausfall einer Einzellitze kommen kann wodurch, aber das Ermüdungsverhalten der restlichen Litzen nicht beeinflusst wird.

Der zweite sogenannte „Runoutversuch“ wurde mit einer erhöhten Oberlast von 55% und einer Schwingbreite von 140 MPa durchgeführt. Es konnten trotz der hohen Anzahl von 50 Millionen Lastwechseln keine Drahtbrüche festgestellt werden. Dies bestätigt die Meinung vieler Forscher dahingehend, dass die Schwingbreite der maßgebende Parameter der Ermüdungsschädigung ist. Die Oberlast spielt hier eine eher untergeordnete Rolle.

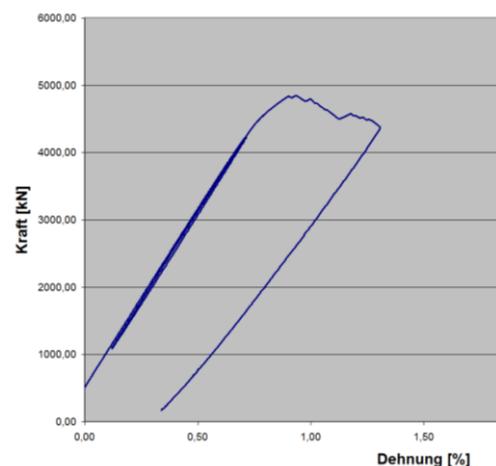
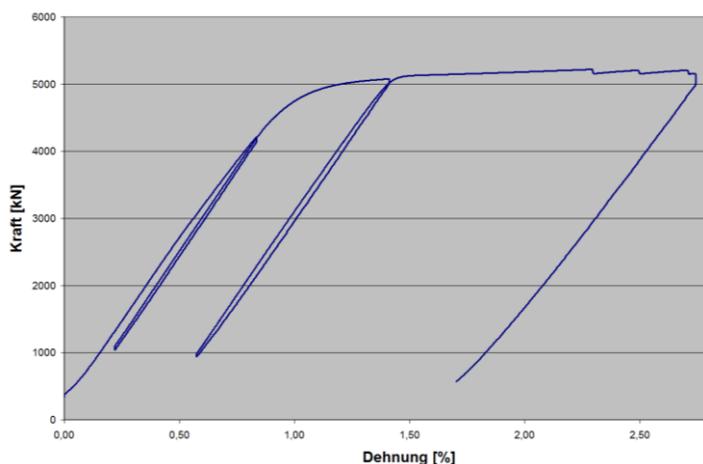


**Abb.2: Reibermüdungsbrüche nach einem Dauerschwingversuch über 50 Millionen Lastwechsel**



**Abb.3: Ermüdungsbruch eines Drahtes am Verankerungskeil**

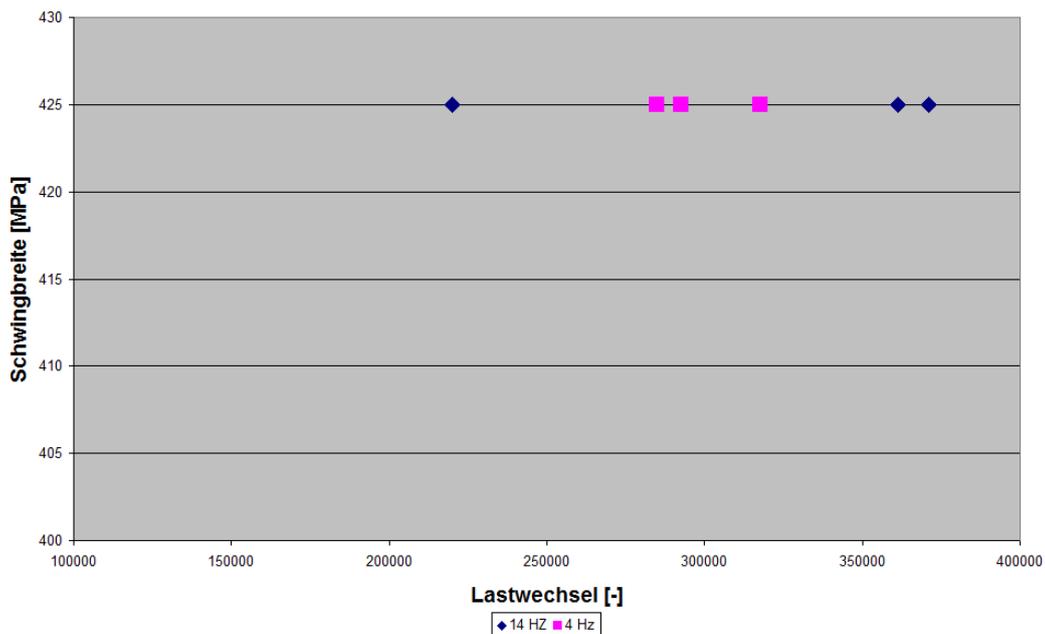
Die in Anschluss an die Ermüdungsversuche durchgeführten statischen Bruchversuche zeigten dass die hohen Lastwechselanzahlen (50 Millionen) einen Einfluss auf das statische Bruchverhalten der Litzensysteme haben. Es konnte ein im Vergleich zu den Versuchen mit bis zu 10 Millionen Lastwechseln weniger duktilen Versagen festgestellt werden, wie in Abbildung 4 und 5 dargestellt. Die maximalen Bruchkräfte lagen etwa 4% bis 6% unter den in den Richtlinien vorgeschriebenen Mindestbruchkräften bei einer Lastwechselzahl von 2 Millionen.



**Abb.4+5: Statischer Bruchversuch nach 10 Millionen Lastwechseln (li) und 50 Millionen Lastwechseln (re) an 19-litzigen Spanngliedern**

Im Zuge der Versuchsserien an 25 einlitzigen Schrägkabelsystemen wurde der Einfluss von Oberlast, Schwingbreite und Frequenz auf das Dauerschwingverhalten der Litzenzugglieder untersucht. Um einen Einfluss der Prüffrequenz während des Dauerschwingversuchs auf die Ermüdungsfestigkeit der Litzenzugglieder feststellen zu können wurden Versuche mit höheren Schwingbreiten ( bis 425 MPa) durchgeführt, um gezielt Drahtbrüche zu erhalten. Die Systeme wurden einerseits mit einer servo-hydraulischen Prüfmaschine mit 4 Hz und andererseits in der Resonanzprüfmaschine mit 14 Hz geprüft. Wie in Abbildung 6 ersichtlich ist, ist bei diesen Frequenzunterschieden kein Einfluß der Prüffrequenz auf das Dauerschwingverhalten feststellbar. Dies bestätigen ebenfalls die Versuche des ersten Forschungsjahrs wo keine Unterschiede bis Frequenzen von 26 Hz erkennbar waren. Für Einzellitzen-systeme konnte eine kritische Schwingbreite, bei der Ermüdungsbrüche während eines Dauerschwingversuches über 2 Millionen Lastwechsel auftreten, bei über 325 MPa gefunden werden.

Die Einzellitzenversuche mit erhöhter Oberlast zeigten erneut den geringen Einfluss dieses Parameters auf das Ermüdungsverhalten und es konnten bei den Versuchen mit 60% GUTS, 200 MPa und 2 Millionen Lastwechsel keine Drahtbrüche festgestellt werden. Beim den anschließend durchgeführten statischen Zugversuchen konnten die in den Richtlinien geforderten Werte bei weitem übertroffen werden.



**Abb.6: Ergebnisse der Einzellitzenversuche mit 425 MPa und Prüffrequenzen von 4 Hz und 14 Hz**

Den Abschluss des experimentellen Versuchsprogramms bildeten zwei Dauerschwingversuche über 2 Millionen Lastwechsel mit einer Oberlast von 60% GUTS und einer Schwingbreite von 160 MPa. Bei beiden Versuchen war, wie schon bei den Einzellitzenversuchen, kein Einfluss der erhöhten Oberlast auf das Dauerschwingverhalten feststellbar. Die Prüffrequenz bei den Versuchen betrug 20 Hz und so konnte jeder Versuch innerhalb von 28 Stunden durchgeführt werden.

## Numerische Berechnungen

Der erste Arbeitsschritt war eine globale lineare dynamische Analyse über das Schwingverhalten der Spanndrahtlitzen, um mögliche Einflüsse von Drahtbrüchen mit der damit verbundenen Änderung der Steifigkeitsverteilung über den Querschnitt bzw. Einflüsse von planmäßig eingepprägten Ankerplattenverdrehungen oder aber auch unplanmäßigen bauseits bedingten Imperfektionen zu ergründen. Die Berechnung wurde temperaturunabhängig durchgeführt, da aufgenommene Temperaturverläufe während der Dauerschwingversuche keinen Einfluss auf das Testergebnis mit sich brachten. Zudem wurden Korrosionsschutzmaßnahmen wie PE- Ummantelungen, Korrosionsschutzfett und Zinkauflagen der Drähte sowie Details in den Verankerungsbauteilen vernachlässigt, da keine mechanischen Auswirkungen in den Interaktionsbereichen zu erwarten waren, um damit überhaupt erst eine effiziente Bearbeitung der beschriebenen FE- Problemstellung zu ermöglichen. Durch Kerbbildungen in den Kontaktstellen bauen sich vorhandene Zinkauflagen ab, womit etwaige Verminderungen von Reibungskoeffizienten vernachlässigt werden können.

Aufgrund der Tatsache, dass aus den Experimenten ein überwiegender Teil der Versagens- bzw. Bruchstellen während den Dauerschwing- und abschließenden statischen Zugversuchen in den Kontaktzonen der Stahlkeile mit den Außendrähten der einzelnen Monostrands lokalisiert und einer bruchmechanischen Untersuchung unterzogen werden konnten, konnten diese spezifischen Stellen als kritisch eingestuft und als s.g. „kritische Interaktionszonen“ (KIZ) definiert werden. Diese Beschränkung auf Detailbereiche ist sinnvoll, weil die getesteten Schrägkabelsysteme aus einzelnen Monostrands mit lokal komplexen Versagensmechanismen in der Verankerung bestehen.

Beanspruchungsbedingt reduziert die vorliegende Zug-Mittelspannung ( $\sigma_m > 0$ ) die ertragbare Spannungsamplitude  $\sigma_a$  aufgrund der Tatsache, dass sich Oberflächenfehler, Defekte bzw. Kerben kritisch als Rissstarter auswirken. Die überlagerte Normal- und Schubspannungsbelastung, die selbst bei reiner einachsialer Zugbelastung auftritt, ruft Spannungsspitzen in der Mantelfläche der Spannstahtdrähte hervor, die in Kombination mit werkstoffbedingten (nicht metallischen Einschlüsse, Ausscheidungen, Größeneffekte) und konstruktiven (Kerbung, Oberflächenrauheit) Einflussgrößen zu beschleunigten Rissinitiierungen an der Oberfläche führen.

Ein FE- Modell konnte auf Basis der experimentellen Versuchsdaten - Geometrieabmessungen, Materialparameter, Rissdimensionen, Randbedingungen sowie Belastungseinträge - exakt entwickelt werden. Die FEM-Problemklassifizierung ergab ein komplexes nichtlineares Spannungsproblem, welches mithilfe einer dreidimensionalen elasto-plastischen FE- Berechnung mit integrierter plastischer Schädigung und Implementierung des Fretting- Phänomens eine Spannungsbewertung hinsichtlich Plastifizierung ermöglichte. In Kombination mit bruchmechanischen Bewertungen von Versagensflächen konnten die Rissinitiierungsstellen innerhalb der KIZ an den Stellen der maximalen Hauptnormalspannungen festgelegt werden, welche an Querschnittsstellen nach erfolgtem Materialverlust, aufgrund von Kontaktpressungen sowie Fretting- Vorgängen, auftraten. Abbildung 7 zeigt die Kerbbildung aufgrund von Materialverlust durch Kontaktpressungen (max. Eindringtiefe  $d \leq 10^{-2} \mu\text{m}$ ) und Reibermüdung (max. Materialabtragtiefe  $\Delta h \leq 10^{-4} \mu\text{m}$ ) innerhalb der KIZ

(Querschnittsverlust bis zu 2,3 %). Reibkorrosionsspuren nach einem Dauerschwingversuch mit 50 Millionen Lastwechseln sind in Abbildung 8 ersichtlich.



Abb. 7: Vernetzung Keil/Litzenzugglied

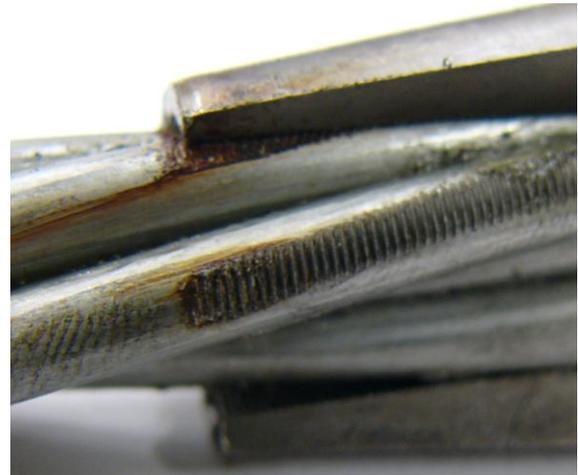


Abb. 8: Reibkorrosion nach 50 Mio. Zyklen

Den Einfluss des zu vorzeitigem Bruch führenden Materialabtrages durch Fretting (Reibkorrosion) und Fretting-Fatigue (Reibermüdung), wurde mit nachfolgend beschriebener Technik in das FE- Modell implementiert. Materialverlust ist die Folge von zyklischen Gleitbewegungen unter hohen Kontaktpressungen der realen Kontaktfläche. In Anlehnung an McColl et al. wurde der modifizierte Lösungsansatz von J.F. Archard entlang der gesamten Kontaktinteraktionszone mit lokalen Kontaktbedingungen für die inkrementellen Materialabtragtiefen erweitert - in Abhängigkeit von Kontaktdruck, relativem Gleitweg sowie lokalem Verschleißkoeffizient. Mit der zyklischen Sprungtechnik konnte der Materialabtrag, für gewählte Abschnitte von jeweils 20.000 Zyklen, mit einem Fretting- Zyklus zu je 50 Gleitinkrementen numerisch simuliert werden.

Die Kontaktbedingungen wurden mit einer expliziten Berechnung mit dem kinematischen Kontaktalgorithmus, unter Zuhilfenahme des abgleichenden Master-Slave-Gewichtungskriteriums, in mehreren Schritten geglättet in das System induziert (Kontaktdefinitionen siehe Abbildung 9).

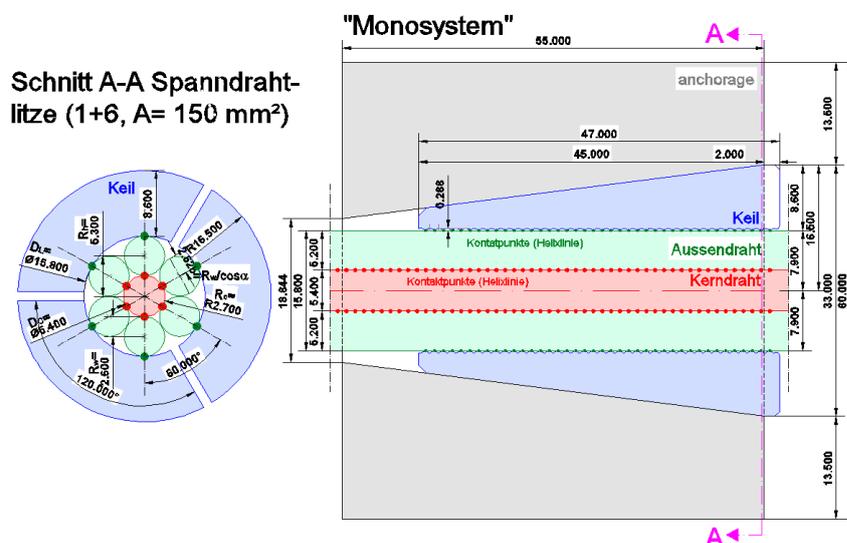
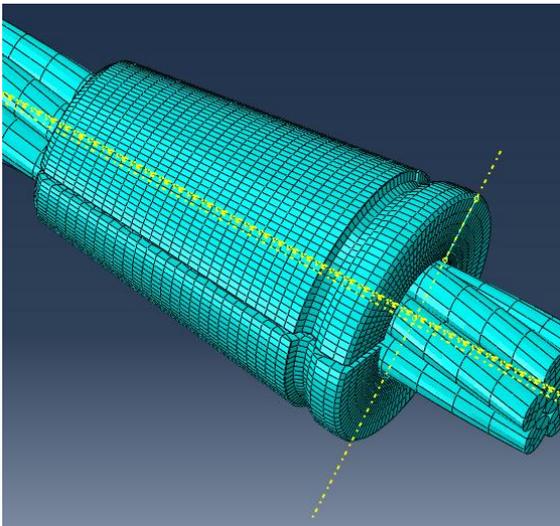


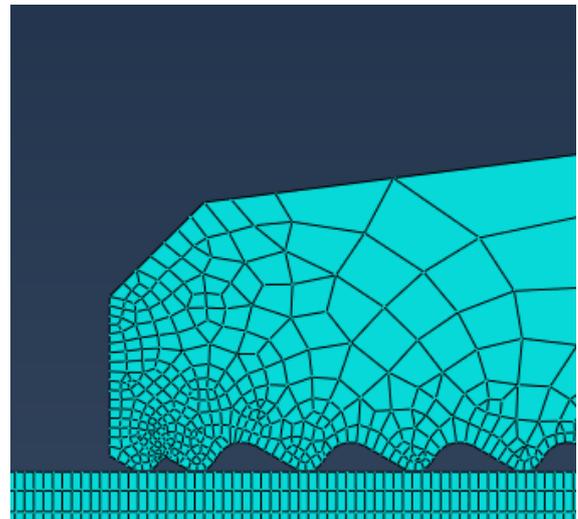
Abb. 9: CAD- Modell: Kontaktbereiche Monostrand

Neben allen Kontaktkonstellationen (Kerndraht/ Außendraht, Außendraht/ Außendraht, Außendraht/ Keil) wurde die durch Materialabtrag hervorgerufene neue Oberfläche inklusive entstandener Reibungsphänomene berücksichtigt. Das GTN-Schädigungsmodell von Gurson et al. berechnet das makroskopische Werkstoffverhalten aus der mikroskopischen Hohlrumentwicklung, so dass sich die duktile Rissinitiierung und damit der Rissstart für die Versagensform der Litzenzugglieder im Bereich der Keile abbilden ließ. Hohlräume auf Basis eines Anfangshohlraumgehaltes wurden dabei vereinigt, mithin Mikrorisse und in weiterer Folge makroskopische Anrisse gebildet, wobei die Schädigungsparameter mit den durchgeführten Tests kalibriert wurden.

Das repräsentative Volumenelement (RVE) fand Verwendung, welches einerseits groß genug zur Abbildung des mittleren, mikroskopischen Geschehens durch homogene kontinuierliche Gleichungen und klein genug für den Verbleib bestehender Gradienten sein musste (Größenordnung  $0,1\text{mm}^3$ ). Abbildungen 10 und 11 illustrieren die Vernetzungstechnik für eine Assemblierung eines dreiteiligen Klemmkeiles mit zugehöriger 7- Drahtlitze sowie den Kontaktbereich der Monolitze mit der vorderen Keilspitze innerhalb der KIZ.



**Abb. 10: Vernetzung Keil/ Litzenzugglied**

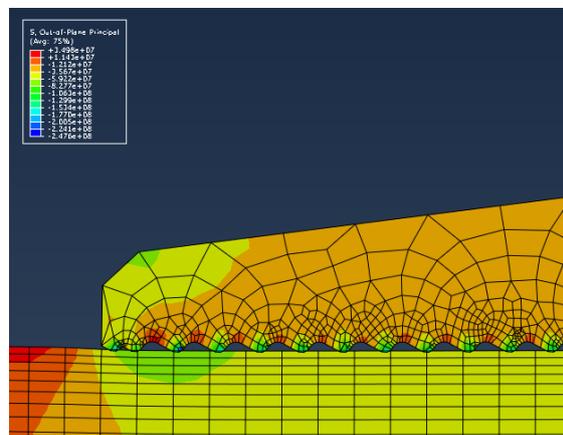


**Abb. 11: FE-Netz ( $t=0$ ) mit gerundeten Keilzacken**

Die statisch bestimmte Lagerung während der FE- Rechnung wurde durch Kopplungen der freien Oberflächen (Litzenquerschnitt, Verankerungskörper) mit zugehörigen Referenzknoten im ersten Step realisiert. Im zweiten Step konnte der "contact pair" Kontaktalgorithmus mit "finite sliding" und einer "umeshmotion"- Subroutine verwendet werden, weil alle Testserien einen vernachlässigbaren Materialabtrag in den einsatzgehärteten Stahlkeilen zeigten. Da sich der überwiegende Substanzverlust innerhalb der KIZ in den Zuggliedern auf den Außendraht beschränkt, wurde der Stahlkeil als Starrkörper ("master surface") sowie die Litzendrähte mit 3D-Kontinuumelementen in Form von Hexaedern mit linearen Verschiebungsansätzen einschließlich reduzierter Integration modelliert. Die Knoten der Kontaktfläche des Außendrahtes ("slave surface") werden mittels Korrosionsmodell in die lokale Richtung des Materialabtrages verschoben. Die gemessenen Werte für die maximalen Eindringtiefen der Keile  $d$  in der Größenordnung von  $100\ \mu\text{m}$  aufgrund der Kontaktdrücke sowie der maximalen Materialabtragtiefen  $\Delta h$  von etwa  $10^{-4}\ \mu\text{m}$  durch

Fretting zeigen im Vergleich mit den experimentellen Testserien gute Übereinstimmungen (siehe Abbildung 7).

Die Belastung wurde analog zur Prüfkrafteinleitung in experimentellen Testserien weggesteuert rein axial am Ende des Litzenquerschnittes mit einer mechanischen Kopplung - für entsprechende Oberlasten und Spannungsschwingbreiten in Form einer zyklischen Verschiebungsamplitude aufgebracht. Aus der elasto-plastischen FE-Rechnung mit inkludiertem Korrosions- und Schädigungsmodell folgten im Kerbbereich der Außendrahtoberfläche im Kontaktbereich zwischen dem Außendraht mit der 2. und 10. Keilzacke die Hauptnormalspannungsmaximen. Bei Berücksichtigung des Korrosionsmodelles erhöhen sich die Spannungsverteilungen um etwa 6 bis 12 %, was zu einer erheblich verfrühten Rissinitiierung und erhöhter Rissfortpflanzung führt, was sich wiederum in der Lebensdauer widerspiegelt. Abbildung 12 zeigt die mit der FEM ermittelte einhüllende Hauptspannungsverteilung im Außendraht am vorderen Ende der KIZ mit 45 % Oberlast und 200 MPa Schwingbreite.



**Abb. 12: Einhüllende der maximalen Hauptspannungen in der KIZ zwischen 2. und 10. Keilzacke**

Um sinnvolle Aussagen über die Lebensdauer der berechneten Strukturdetails tätigen zu können, wurde im Anschluss an die beschriebene elasto-plastische FE- Berechnung, die Bruchinitiierungspunkte hervorbringt, anhand von berechneten Spannungsintensitätsfaktoren (SIF) eine zyklische Spannungsbewertung in der Sphäre der Bruchmechanik in Anlehnung an Kuna durchgeführt.

An den o.a. Rissstartstellen erfolgte senkrecht zur größten Hauptnormalspannung  $\sigma_1$ , welche unter einem Winkel  $\alpha_F$  von  $45^\circ$  bis  $50^\circ$  gegen die Kerndrahtachse geneigt ist, ein geneigter Anriss, der nach stabiler Ermüdungsrissausbreitung ab einem Thresholdwert für den kritischen zyklischen Spannungsintensitätsfaktor  $\Delta K_{Ic}$  zu instabilem Risswachstum führte und in einem Restgewaltbruch endete, der wiederum entsprechend dem Spannungsverlauf  $\sigma_1$  in einem Winkel  $\alpha_R$  von etwa  $90^\circ$  als Trennriss verlief. Aufgrund der Festigkeits- und Bruchflächenanalyse wurde ein elliptischer Oberflächenriss mit typischem a/c- Verhältnis von 1/3 mit einer Anfangsrisslänge  $a_0$  von 0,1 mm in der Größenordnung einer durch den beschriebenen Reibvorgang verursachten Kerbe postuliert und analysiert. Für die bruchmechanische Bewertung wurde linear elastisches Werkstoffverhalten mit einer im Vergleich zur Risslänge kleinen plastischen Zone, so genanntes Kleinbereichsfließen an der Riss Spitze angenommen, da die Voraussetzungen der linear elastischen Bruchmechanik erfüllt waren. Durch die

vorhandene Mehrachsigkeit der Belastung, aufgrund der Kerbung bzw. Spannungsverteilung zufolge Verdrehung der Außendrähte der Zugglieder, trat eine allgemeine Mixed-Mode- Beanspruchung durch Überlagerung von Mode I und Mode II auf, die eine Richtungsänderung des Risses bewirkte (siehe Abbildungen 13 und 14).

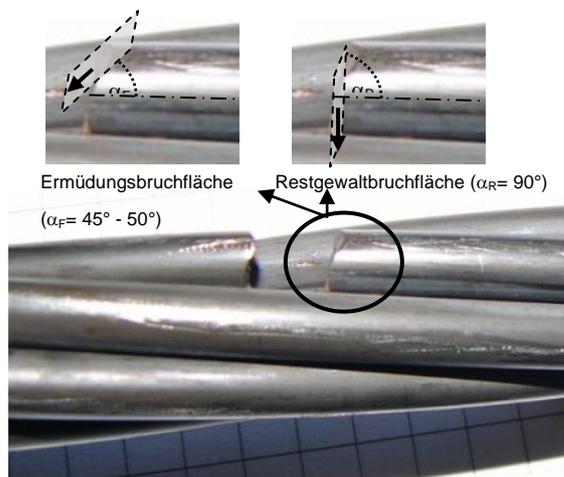


Abb. 13: Ermüdungsbruch in einem Außendraht durch Keil/ Draht Interaktion



Abb. 14: Makroskopische Charakterisierung einer Litze der Ermüdungsbruchfläche innerhalb der KIZ

Mode I trat aufgrund der überwiegenden Zugbelastung und Mode II durch die Querpessungen und damit verbunden Schubbeanspruchung auf, welches zu entgegengesetztem Gleiten der Rissoberfläche führte. Der geringfügig auftretende Mode III - aufgrund der Torsionsbelastung, die entgegengesetztes Gleiten der Rissoberfläche quer zur Rissrichtung hervorruft - konnte aufgrund unbedeutender Größenordnungen der SIF vernachlässigt werden.

In einer weiteren Studie wurde auf der freien Länge der Spannkabel die komplexe Kontaktfläche zwischen den Spanndrahtlitzen selbst, bestehend aus sechs helixförmig verschlagenen kaltgezogenen Außendrähten um einen Kerndraht, und den benachbarten Drähten erfasst (siehe Abbildung 15). Begleitende analytische Berechnungen der spiralförmig gedrehten Litzen unter axialer Zugbelastung wurden in Anlehnung an G.A. Costello durchgeführt, demzufolge achsiale und Torsionsverformungen auch bei rein einachsiger Belastung simultan auftraten.

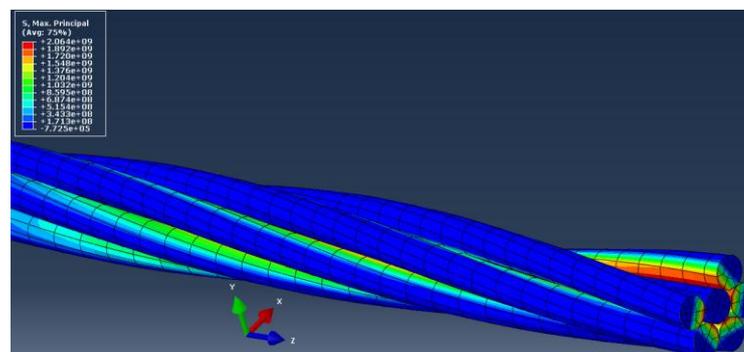


Abb. 15: max. Hauptnormalspannung  $\sigma_1$  Spanndrahtlitze 1+6 (50% R<sub>m</sub>)

### 3. Schwierigkeiten – welche Ziele/Meilensteine wurden nicht erreicht?

Beschreiben Sie welche Lösungsansätze oder Projektteile nicht realisiert wurden und führen Sie eine Begründung an.

Aufgrund des implementierten Korrosionsmodelles zur Simulation der Reibermüdung bzw. -korrosion in den Kontaktzonen treten Ermüdungsrisse zeitweilig wesentlich früher oder aber bei bedeutend kleineren Spannungsamplituden auf, als es die Testergebnisse zeigen. Des weiteren sind Belastungskonfigurationen, die aus einer Kombination von behandelter Zugbelastung inklusive Materialabtrag mit wind-, regen- und schwingungsinduzierten Biegeverformungen bestehen, mit enormem numerischem Rechenaufwand verbunden. Eine Reduktion auf ein Monosystem scheint darüber hinaus für derartige Anwendungen nicht sinnvoll, weil für die Ermittlung von Biegespannungen die gesamtheitliche Betrachtung, u.a. von Verankerungsbereichen inklusive Kabelspreizungen, unbedingt notwendig erscheint. Bei diesen realen Betriebsbelastungen sind in der darauffolgenden entkoppelten bruchmechanischen Bewertung zusätzlich Reihenfolgeeffekte u.a. mit diffizilen Fließstreifenmodellen zu berücksichtigen.

Weitere bruchmechanische Materialuntersuchungen, beispielsweise eine exakte experimentelle Ermittlung der kritischen Bruchzähigkeit  $K_{Ic}$ , bedingen einen hohen finanziellen Aufwand.

Für die FE- Berechnung wurden die in der Praxis abgelösten, stark abrasiv wirkenden härteren Verschleißpartikel in der Zwischenschicht der KIZ wie auch der auftretende Einfluss der Umgebungsbedingungen auf den Korrosionsvorgang mittels erhöhtem Colomb'schem Reibungskoeffizienten in Anlehnung an Madge, J.J., et al. simuliert, der dem Verhältnis von durchschnittlicher Reibungskraft zu Normalkraft entspricht und einen gemittelten Wert über die gesamten Lastzyklen darstellt. Weitere nicht berücksichtigte, destruktive Begleiterscheinungen sind beschleunigtes Risswachstum in der korrosiven Atmosphäre in Form der Schwingungsrissskorrosion als auch mögliches Eindiffundieren von Wasserstoff an der Rissspitze als so genannte Wasserstoffversprödung.

### 4. Zusammenfassung und Resümee, Wirtschaftliche Verwertung

Ziehen Sie ein Resümee über das durchgeführte Projekt und führen Sie an, welche Maßnahmen zur wirtschaftlichen Verwertung gesetzt wurden. Ergänzen Sie diesen Bericht mit dem Status von Patenanmeldungen.

Im Zuge des Forschungsvorhabens konnte erstmals das Dauerschwingverhalten unter realitätsnahen Bedingungen untersucht werden. Durch den Einsatz der Resonanzprüfmaschine wurden in relativ kurzer Zeit Dauerschwingversuche mit bis zu 50 Millionen Lastwechseln durchgeführt, die in herkömmlichen servo- hydraulisch gesteuerten Anlagen technisch und wirtschaftlich so gut wie unmöglich gewesen wären. Das Versuchsprogramm war so ausgelegt, dass unterschiedlich große Litzenzugglieder mit verschiedenen Versuchsparametern getestet wurden, wobei speziell der Einfluss der Lastwechselzahl ein Forschungsschwerpunkt war. Die Parameter wie Oberlast, Schwingbreite und Prüffrequenz konnten ebenfalls genauer untersucht werden. Es zeigte sich, dass ein geringer Einfluss der Lastwechselzahl (bis 10 Millionen) gegeben ist. Die Versuche bis 50 Millionen Lastwechsel bestätigten die hohe Zuverlässigkeit der

Litzenzuglieder gegen ein Ermüdungsversagen. Die bestehenden Normen werden darin einerseits bestätigt dass eine geforderte Lastwechselzahl von 2 Millionen Lastwechseln ausreichend ist. Da eine Brücke über ihre Lebensdauer hinweg mit weitaus mehr als 2 Millionen Lastwechseln beansprucht wird, jedoch bei geringeren Schwingbreiten als die Richtlinien für Versuche vorsehen, konnten durch die Versuche mit bis zu 50 Millionen Lastwechseln jegliche Sicherheitsbedenken beseitigt werden.

Der große Vorteil von parallel geführten Litzenbündeln ist jener, dass es zu keiner progressiven Schädigung des Gesamtsystems kommen kann. Durch den Austausch einzelner Litzen ist es möglich, beschädigt Kabel zu wechseln ohne das ganze Bündel erneuern zu müssen. Bei Versuchen mit erhöhter Oberlast (bis 60% GUTS) kam es ebenfalls zu keiner Schädigung während der Dauerschwingversuche und die geforderten Mindestwerte bei den statischen Bruchversuchen konnten erreicht werden. Aufbauend auf diesen Ergebnissen ist eine wirtschaftlichere Verwendung der Systeme durch Einsparung von Spannstahl durchaus möglich.

Mit Hilfe der Finiten Elemente Methode und anschließender entkoppelter experimentell getesteter Schrägkabelsysteme inklusive auftretender Fretting- Phänomene (Reibkorrosion und -ermüdung) bei dynamischer und statischer Belastung untersucht werden. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse konnten zum einen zur Kategorisierung von Versagensformen und Bewertung von Anschlussdetails dieser Schrägkabelsysteme beitragen. Aus den Ergebnissen lässt sich ableiten, dass die beschriebenen Systeme dank umfangreicher Systementwicklungen aktuell bereits einen hohen Stand der Technik aufweisen. Zum anderen stellen die FE- Ergebnisse eine Basis für zukünftige weitere numerische Studien dar, welche unterschiedliche Prüffrequenzen, Umgebungsbedingungen und schließlich Belastungskonfigurationen berücksichtigen können.

#### Literaturverzeichnis:

- Archard, J.F. (1980), Contact and Rubbing of Flat Surfaces. Journal of Applied Physics, 24/8, pp. 981-988.
- Costello, G.A. (1997), Theory of Wire Rope Second Edition. Springer-Verlag, New York.
- Gurson, A.L. (1977), Continuum Theory of Ductile Rupture by Void Nucleation and Growth: Part I- Yield Criteria and Flow Rules for Porous Ductile Media. Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 99, No. 1, S2-15.
- Kuna, M. (2008), Numerische Beanspruchungsanalyse von Rissen - Finite Elemente in der Bruchmechanik. John Wiley & Sons, Inc., Cambridge, Massachusetts, USA.
- Madge, J.J., Leen, I.R., McColl, P.H. (2007), Shipway, Contact-evolution based prediction of fretting fatigue life: effect of slip amplitude. Wear, 262, pp. 1159-1170.
- McColl, I.R.; Ding, J.; Leen, S.B. (2004), Finite element simulation and experimental validation of Fretting wear. Wear, 256, pp. 1114-1127.

## 5. Erläuterungen zur Endabrechnung

Die **Endabrechnung** ist als eigene Datei im Excel-Format hochzuladen. Die Verwendung der im eCall zur Verfügung gestellten Vorlage ist verpflichtend.

Beachten Sie den Kostenleitfaden: [www.ffg.at/kostenleitfaden](http://www.ffg.at/kostenleitfaden)

Abweichungen vom Kostenplan sind an dieser Stelle zu beschreiben und zu begründen.

Fügen Sie hier Ihren Text ein ...