

# Reduktion der Prozesskomplexität durch Integration der Lebensdauerberechnung in die FEM-Simulation

Dipl.-Ing. **A. Berndt**, Daimler Truck AG, Stuttgart;  
Dipl.-Ing. **J. Michy**, Daimler Truck AG, Stuttgart;  
Dr.-Ing. **M. Klein**, INTES GmbH, Stuttgart;

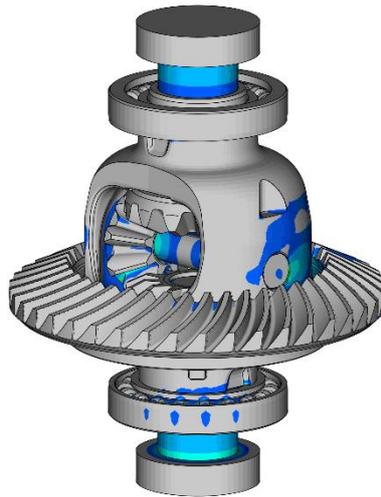


Bild 1: Differential - Spannungsverteilung bei Belastung des Tellerrads

## Kurzfassung

Die Lebensdauerberechnung hat sich als Ergänzung, basierend auf einer Spannungsberechnung, in der industriellen Anwendung etabliert. Die zusätzlichen Erkenntnisse werden zur Auslegung von Bauteilen und Baugruppen im Leichtbau verwendet.

Als eigenständige Simulation führt die Lebensdaueranalyse zu zusätzlichen Anforderungen an den Simulationsprozess. Dazu gehört der Austausch großer Datenmengen zwischen Programmen/Rechenservern mit teilweise unterschiedlichen Schnittstellenformaten und wechselnder Zuordnung von Einzeldaten sowie verschiedener Modellbeschreibung bzw. Namensräumen. Die Umsetzung und sichere Handhabung dieses Prozesses obliegt dem Anwender und ist nicht Bestandteil der einzelnen Programme. Berücksichtigt werden müssen neben dem Datenhandling die unterschiedlichen Release-Zeiträume der beteiligten Software. Alles zusammen führt zu Problemen mit der Qualität und Effizienz in der industriellen Anwendung.

Als Lösung wird die vollständige Integration der Lebensdaueranalyse in einen allgemeinen FEM-Solver [1] vorgestellt. Beide Berechnungsteile, die klassische Spannungsberechnung und die Lebensdauerberechnung, setzen dabei auf ein gemeinsames Datenmodell auf und nutzen die gleichen Ressourcen. Dadurch wird Konsistenz und Dateneffizienz garantiert (große Daten bleiben intern, doppeltes Datenhandling wird vermieden) und der Import/Export bzw. die Archivierung von Zwischenergebnissen entfällt.

Weitere Vorteile ergeben sich aus der einfachen Verwendung zusätzlicher Ergebnisse, welche bislang mangels geeigneter Schnittstelle nicht verwendet werden konnten. Zu nennen sind hierbei z.B. Spannungsgradienten, welche bislang von den Lebensdauerprogrammen auf Basis eigener Modelldaten zusätzlich gerechnet wurden und nun in besserer Qualität direkt innerhalb der FEM-Software auf Basis der originalen FEM-Formulierung in inhärenter Konsistenz zur Verfügung stehen. Dies kann zur Steigerung der Ergebnisqualität eingesetzt werden. Durch den Wegfall des Datenaustausches und die HPC-Ausrichtung der FEM-Software profitiert die integrierte Lebensdaueranalyse deutlich in der Performance.

Sämtliche Vorteile werden anhand eines Praxisbeispiels aus der Industrie illustriert. Dabei stehen die Prozessvereinfachung und die Rechenzeitreduzierung im Vordergrund.

Ein anschließender Ausblick zeigt auf welche Anwendungen durch diese innovative Vorgehensweise zusätzlich erschlossen werden können.

## **Abstract**

The fatigue life analysis, based on a stress calculation, is established in industrial applications. The additional findings are used to design components and assemblies in lightweight construction.

As independent simulation tool, the fatigue life analysis leads to additional requirements for the simulation process. This includes the exchange of large amounts of data between programs/computer servers with partially different interface formats and changing assignment of individual data as well as different model descriptions or namespaces. The implementation and safe handling of this process is the responsibility of the user and is not part of the individual programs. In addition to data handling, the different release periods of the software involved must also be taken into account. All of this leads to problems with quality and efficiency in industrial applications.

As a solution, the complete integration of the fatigue life analysis into a general FEM solver is presented. Both parts of the calculation, the classic stress calculation and the fatigue life calculation, are based on a common data model and use the same resources. This guarantees consistency and data efficiency (large data remains internal, double data handling is avoided) and the import/export or archiving of intermediate results is no longer necessary.

Further advantages result from the simple use of additional results, which previously could not be used due to a lack of a suitable interface. For example, of stress gradients, which were previously additionally calculated by the fatigue life programs based on their own model data and are now available in inherent consistency and better quality directly within the FEM software based on the original FEM formulation. This can be used to increase the quality of the results. Due to the elimination of data exchange and the HPC orientation of the FEM software, the integrated fatigue life analysis benefits significantly in terms of performance.

All advantages are illustrated using a practical example from industry. The focus is on process simplification and the reduction of computing time.

An outlook shows which applications can also be opened up by this innovative approach.

## 1. Motivation

Der Antriebsstrang eines LKWs ist während des Betriebs unterschiedlichsten Belastungsniveaus ausgesetzt. Die Simulation liefert Ergebnisse, um die Komponenten des Antriebsstrangs den Anforderungen entsprechend auszulegen. Die Lebensdauervorhersage ist für die virtuelle Produktentwicklung mit Simulationsmethoden etabliert, aber bisher immer ein zusätzlicher Schritt mit zusätzlicher Software, zusätzlichen Schnittstellen und hohen Anforderungen an den Speicherplatz.

Daraus ergibt sich, dass es Raum für deutliche Verbesserungen gibt. Durch Vereinfachung der Prozesskette wird die Komplexität reduziert. Die Anzahl der verwendeten Dateiformate, die Fehlerquellen und das Daten-Caching bzw. die Größe des belegten Speicherplatzes werden reduziert.

Durch die Beschleunigung der Laufzeiten wird die virtuelle Produktentwicklung beschleunigt. Insgesamt lässt sich dann durch die neuen innovativen Möglichkeiten, die Reduktion der Rechenzeit und die Erhöhung der Genauigkeit für die Anwender der Software mit der neuen vereinfachten Prozesskette ein deutlicher Technologievorsprung realisieren.

## 2. Differentialgehäuse - Aufgabenstellung

Ein begleitendes industrielles Beispiel und der zugehörige Prozess dienen hier als Referenz für die Neuentwicklung. Die Bewertung der Gesamtschädigung des Differentialgehäuses (Bild 2) ist Ziel der Simulation. Es ist zu berücksichtigen, dass unterschiedliche Belastungsniveaus, je nach Region, unterschiedlich häufig auftreten. Die unterschiedliche Häufigkeit der Belastungsniveaus wird verursacht durch regional unterschiedliche Ausnutzung der maximalen Beladung, Strecken- und Straßenqualität, gefahrene Geschwindigkeiten und Höhenprofile. Die Belastung besteht im Wesentlichen aus konstanten Montagelasten, wie z.B. Presspassungen und durch die umlaufende Last durch Zahneingriff am Tellerrad.

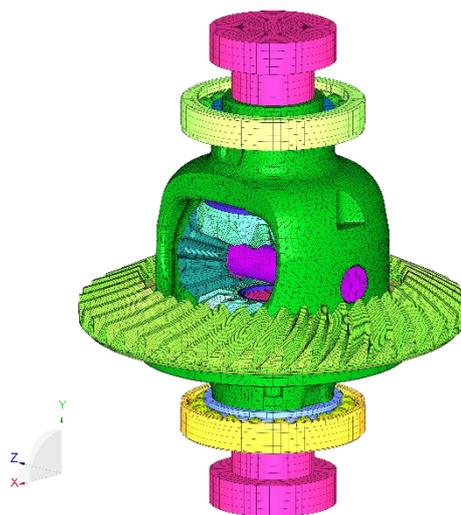


Bild 2: Differential – Finite Elemente Modell

Das Berechnungsmodell besteht aus ca. 600.000 Knoten, ca. 400.000 Elementen und ca. 1.000 MPCs, bei ca. 1.7 Millionen Unbekannten. Es gibt 36 Kontaktgebiete. Drei

Montageschritte werden durchgeführt, die zu einer konstanten Basislast führen. Danach werden in 41 Lastschritten jeweils die Kräfte des Zahneingriffs umlaufend aufgebracht. Es ergeben sich die entsprechenden Verformungen und Spannungsergebnisse.

### 3. Bisheriger Berechnungsprozess

Der bisherige Standardablauf für eine Lebensdauerberechnung gliedert sich im Wesentlichen in drei Schritte.

Der 1. Schritt ist eine klassische Spannungsanalyse. Bild 3 zeigt diesen Prozessschritt. Zu Beginn wird das Modell von einer Festplatte gelesen und am Ende die Ergebnisse geschrieben. Dabei wird für jede Lastkonfiguration jeweils eine Datei mit den Knotenpunktspannungen geschrieben. Zur Datenreduktion, und um die Schreib- und Lesevorgänge zu minimieren, werden häufig nur die Knotenpunktspannungen der Oberflächenknoten ausgegeben.

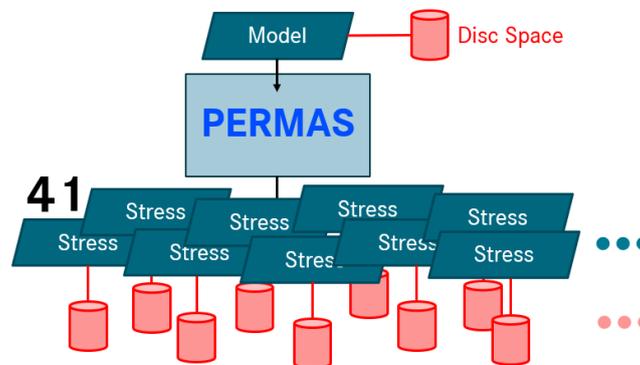


Bild 3: Spannungsberechnung mit Dateiooutput der Spannungen

Die Reduktion auf die Oberfläche verhindert aber, dass die Stützwirkung der Spannungsgradienten normal zur Oberfläche, also ins Innere des Bauteils gerichtet, zur Verbesserung der Lebensdauerbewertung, berechnet werden können.

Im 2. Schritt werden 70 Lebensdauerberechnungen mit unterschiedlichen Lastniveaus durchgeführt. Dazu müssen jeweils alle Spannungsergebnisse gelesen und verarbeitet werden. Zusätzlich ist für jede Berechnung die Modelldatei zu lesen. In Bild 4 ist der Ablauf dargestellt, der 70-mal durchgeführt wird. Unten rechts im Bild ist die Wiederholung angedeutet.

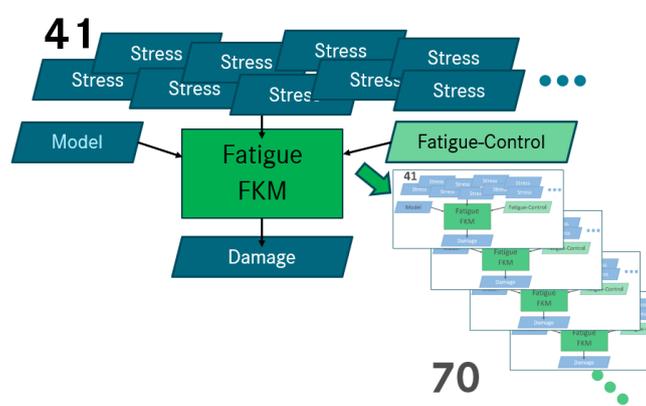


Bild 4: 70 Lebensdauerberechnungen

Insgesamt werden 70 Dateien mit Lebensdauerergebnissen geschrieben.

Der 3. Schritt besteht aus dem Einlesen der zuvor durch 70 Berechnungen einzeln geschriebenen Schädigungsergebnisse für die einzelnen Lastniveaus. Daraus wird über ein Skript unter Berücksichtigung der Häufigkeit der jeweiligen Lastniveaus die kollektive Gesamtschädigung berechnet (Bild 5).

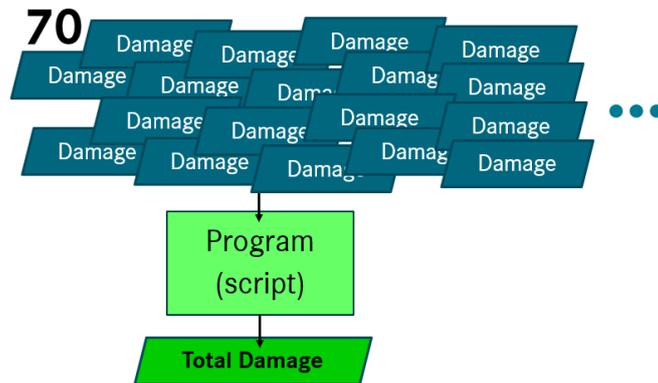


Bild 5: Gesamtschädigung aus 70 Lebensdauerberechnungen

Die drei Schritte sind in dem bisherigen Gesamtprozess voneinander getrennt (Bild 6). Die Analysen müssen nacheinander aufgerufen werden oder über Skripte gestartet werden. Der Gesamtprozess unterliegt damit nicht der Wartung eines Softwareherstellers, sondern wird eigenverantwortlich angepasst, wenn einzelne Softwarebestandteile ein Update bekommen. Die Erfahrung zeigt, dass derartig verkettete Prozesse Innovationen und Weiterentwicklung nicht fördern, sondern eher den Status Quo zementieren. Überdies erfordert die Kontrolle des Gesamtprozesses vom Anwender auch Aufmerksamkeit und Zeit, welche dann der eigentlichen Analyse der Simulationsergebnisse verloren geht.

Die vielen manuellen Eingriffe zum wiederholten Starten der Einzelschritte und die manuelle Organisation der Daten sind typische Fehlerquellen.

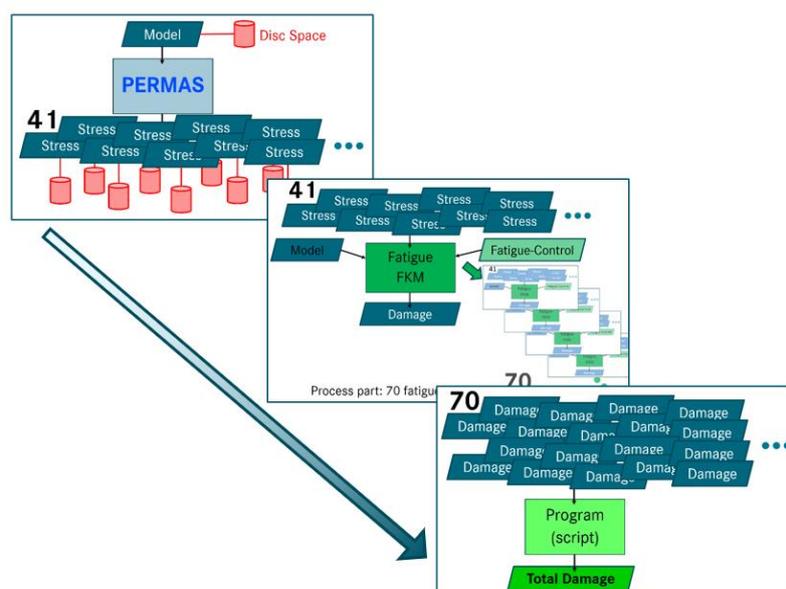


Bild 6: Bisheriger Gesamtprozess aus drei Einzelschritten

Zusätzlich zu den häufigen manuellen Eingriffen sind die Datenmengen sehr groß. Deshalb sind sowohl die Schreib- und Lesezeiten für die Daten, als auch das Kopieren an den Bereitstellungsort auf der lokalen Festplatte ein wesentlicher Zeitfaktor. Die Datenhaltung und Datenbereitstellung sind folglich sehr aufwändig.

Die Datenmenge und die Rechenzeiten, besonders für den Lebensdauerberechnung, die hier im 2. Schritt 70-mal durchgeführt wird, begrenzt die Modellgröße und dadurch die generelle Modellgenauigkeit.

#### 4. Verbesserungen für den industriellen Simulationsprozess

Der neue vollständig integrierte PERMAS-LIFE Arbeitsablauf reduziert die Fehlerquellen, beschleunigt den Prozess und erhöht die Genauigkeit der Ergebnisse. Der Ablauf in Bild 7 zeigt die deutlich verringerte Komplexität.

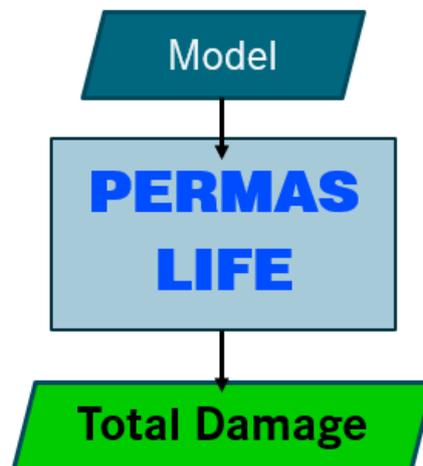


Bild 7: Neuer Gesamtprozess mit PERMAS

Dieser Prozess ist für Lastkollektive, wie im begleitenden Beispiel, für Zeitfunktionen über Lastfälle oder Eigen Modes, Lastgeschichten (auch Ausschnitte) und in Zukunft auch für PSD-Lastkollektive (Power Spectral Density) für Frequenz- und Stochastische-Schwingungsantworten verfügbar. Der neue Prozess ersetzt alle in Bild 6 gezeigten Schritte inklusive der Wiederholungen, der Datenhaltung, der Skripte und der manuellen Eingriffe.

Die wesentlichen Charakteristika sind eine einheitliche Eingabesyntax, effizientes Datenhandling, Nutzung der HPC-Stärken der FEM-Software und die Nutzung von FEM-internen Modellparameter. Die Implementierung basiert zusätzlich auf dem Wissen und der Erfahrung von Experten [2] aus dem Fachgebiet Lebensdauerberechnung. Durch die vollständige Integration ist der Gesamtprozess Teil der kommerziellen Softwarewartung und damit zukunftssicher bei Versionsänderungen.

Insgesamt ergeben sich durch die vollständige Integration folgende Vorteile:

- Eine Software mit einer Eingabesyntax,
- Gesamtprozess Teil der Softwarewartung,

- Effizientes Datenhandling basierend auf gemeinsamen Daten ohne Import und Export von Spannungsergebnissen,
- Nutzung der HPC-Stärken der FEM-Software, wie die Parallelisierung, GPU-Unterstützung und effizientes Datenmanagement und
- Nutzung von Solver-Internem Modellwissen und von bereits berechneten Informationen/Ergebnissen, wie Spannungsgradienten, Normalenrichtungen an der Oberfläche und Elementansatzfunktionen.

Der Begriff „Integration von Software“ ist teilweise negativ besetzt, da häufig, wie in Bild 8 gezeigt, zwei Softwareteile nur unter einer Hülle zusammengefasst werden, die aber trotzdem noch auf zwei unterschiedlichen Datenbasen mit unterschiedlichen Software-Philosophien beruhen. Die Daten werden dann meist über Schnittstellen, sogar häufig noch über Dateien, die auf der Festplatte gespeichert werden, ausgetauscht. Diese Art der Integration kann als oberflächliche Integration bezeichnet werden, da sie zwar im besten Falle die Komplexität verstecken, aber die eigentlichen Abläufe und Schnittstellenproblematik nicht verbessern.

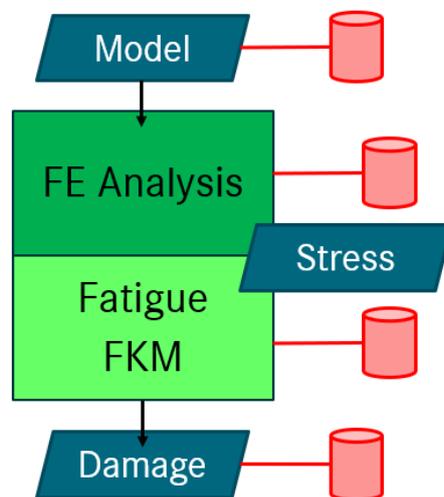


Bild 8: Unvorteilhafte oberflächliche Integration

Einzig verbleibender Vorteil einer oberflächlichen Integration ist die gemeinsame Eingabesyntax, die aber nur geringen Nutzen stiftet und nicht das Potential einer vollständigen Integration ausschöpft.

Im Gegensatz dazu soll hier anhand der Spannungsgradienten beispielhaft das Potential der vollständigen Integration gezeigt werden. Es werden hochwertige Knotenpunktspannungsgradienten berechnet, die deutlich besser als die üblicherweise verwendeten finiten Differenzen ins Innere sind. Die hohe Genauigkeit wird erreicht durch die Differentiation der via Elementansatzfunktionen interpolierten Knotenpunktspannungen und der anschließenden Mittelung am Knoten. Bild 9 zeigt die so ermittelten Knotenspannungen und Knotenspannungsgradienten.

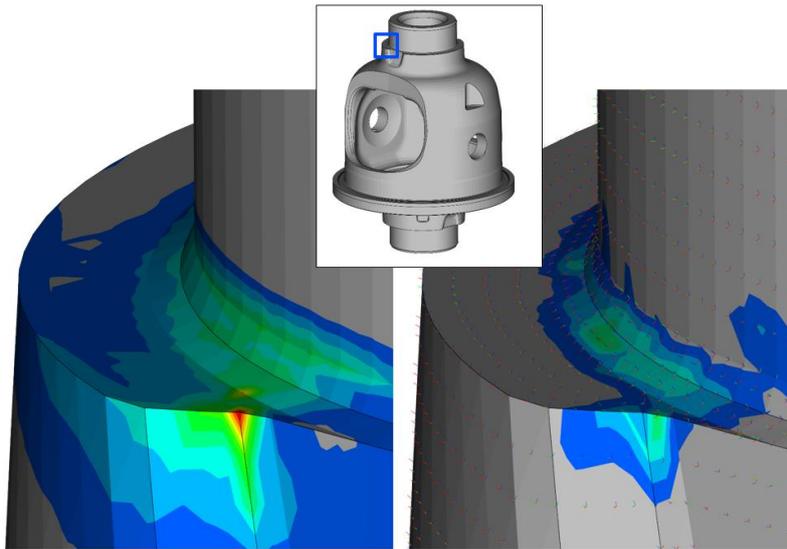


Bild 9: Knotenspannungen (links) und Knotenspannungsgradienten als Skalar und Tensor (rechts) an einem Ausschnitt des Differentialgehäuses

Durch den neuen Gesamtprozess werden alle zuvor extern geskripteten Zwischenschritte durch interne Funktionen mit Wartung abgedeckt. Wenn gewünscht, kann auf die Spannungsausgabe sogar vollständig verzichtet werden, um den Speicherplatz zu sparen. Dadurch können selbst fein vernetzte Modelle gerechnet werden für deren Spannungsergebnisse der Speicherplatz auf der Festplatte nicht ausreicht.

Die Steuerung aller Schritte dieses komplexen Vorgangs wird in der Solversyntax durchgeführt. Durch die Verwendung von Namen für alle Zuweisungen und Definitionen können die Daten für die Lebensdauerberechnung in eigene Dateien separiert und wiederverwendet werden. Materialzuweisungen erfolgen gemeinsam für die Spannungs- und Lebensdauerberechnung. Fehler durch versehentlich unterschiedliche Materialzuweisungen werden so ausgeschlossen.

Die in Bild 10 gezeigte Gesamtschädigung wird durch einen einzigen Programmaufruf erzeugt. Dabei werden die Spannungen der 41 Lastschritte und die 70 Einzelschädigungen als interne Zwischenschritte berechnet, ohne dass der Anwender sie organisieren muss.

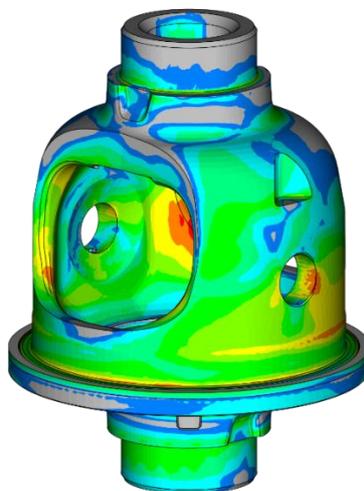


Bild 10: Gesamtschädigung am Differentialgehäuse

Die Gesamtschädigung liegt ohne manuelle Eingriffe nach insgesamt 22 Minuten Rechenzeit für alle Rechenschritte (auf einen 18-Rechenkern Computer) vor. Ein exakter Vergleich der Rechenzeiten oder Speed-Up zum bisherigen Prozess lässt sich nicht ermitteln, da die Zeiten für die vormals notwendigen manuellen Eingriffe und Datenübertragungen nicht messbar sind. Der Prozess wurde insgesamt um Größenordnungen beschleunigt.

## **5. Zusammenfassung und Ausblick**

Die vollständige Integration der Lebensdauerberechnung in den FEM-Solver verbessert den Gesamtprozess um Größenordnungen. Vorher einzelne Schritte, die zudem noch über individuelle Skripte gesteuert wurden, sind in einem Gesamtprozess vereint. Die Prozesssicherheit ist durch die Reduzierung der Komplexität deutlich erhöht worden. Spannungs- und Lebensdauerberechnung sind in einer konsistenten Software vereint. Schnittstellen und Komplikationen mit der Datenhaltung sind durch diesen Ansatz ausgeschlossen. Zusätzlich ist die Genauigkeit für die Spannungsgradienten erhöht worden und die Laufzeit wurde drastisch reduziert. Der gezeigte Prozess ist robuster, genauer und schneller.

Diese Merkmale eröffnen in Zukunft die Möglichkeit die Lebensdauerberechnung in Zukunft in der Optimierung und für das Sampling für industrielle Routineanwendungen in der virtuellen Produktentwicklung zu nutzen.

## **Literatur**

- [1] <https://www.intes.de>
- [2] <https://www.stz-verkehr.de/winlife.html>