

# Kopplung von stochastischer FEA und Schädigungsanalyse

Gunther Wehr

ZF Friedrichshafen AG

## Zusammenfassung

Durch die Berücksichtigung von Streuungen in der Berechnung lassen sich ohne Feld- oder Versuchsdaten Bauteile bzw. Bauteilgruppen hinsichtlich ihrer Zuverlässigkeit beurteilen.

Die Integration der Schädigungsanalyse in den Berechnungsablauf ermöglicht die Berücksichtigung von lastniveau- und lastwechselabhängigen Festigkeitseigenschaften.

Neben Aussagen zur Bauteilzuverlässigkeit lassen sich wichtige Einflussgrößen für eine Verbesserung des Bauteilverhaltens bestimmen. Mit den vorgenannten Informationen können Fertigungsaufwand und erreichbarer Benefit hinsichtlich der Produktqualität unmittelbar in Zusammenhang gebracht werden. Voraussetzung hierfür ist jedoch eine genaue Kenntnis der statistischen Eigenschaften der Eingangsgrößen.

**Keywords:** Stochastische FEA, Schädigungsanalyse, Antriebsstrang

# 1 Einleitung

ZF entwickelt und produziert Antriebs- und Lenksysteme sowie Fahrwerksysteme und –komponenten für die Automobilindustrie. Weitere Einsatzfelder für ZF Produkte sind z.B. Marine und Luftfahrt. Ein Schwerpunkt bei der Auslegung bildet dabei die Beurteilung der Betriebsfestigkeit von Systemkomponenten.

Schwierig, im Hinblick auf eine effiziente Auslegung von Bauteilen und Bauteilgruppen, gestaltet sich der Umstand, dass Eingangsgrößen einer FE-Analyse zur Spannungsermittlung oder Schädigungsanalyse zur Betriebsfestigkeitsbestimmung streuungsbehaftete Größen sind.



Abbildung 1: ZF Produkte für den PKW

Für den klassischen Bauteilnachweis werden deterministische Eingangswerte vorausgesetzt. Je nach Auslegungsstrategie erfolgt die Absicherung von Grenzwerten des zu erwartenden Toleranzbandes über die Annahme konservativer Grenzlagen der Eingangsparameter. Die Kombination einer Reihe von konservativen Eingangswerten kann jedoch zu einer Überdimensionierung bzw. zu nicht erfüllbaren Nachweisen führen.

In diesen Fällen könnte durch die Berücksichtigung von streuenden Eingangswerten in der Berechnung Abhilfe geschaffen werden. Im Rahmen einer Robustheitsanalyse ist die Quantifizierung von Zusammenhängen zwischen Eingangsgrößen und dem Strukturverhalten bzw. der Strukturempfindlichkeit (Korrelationen) ableitbar. Durch eine Zuverlässigkeitsanalyse lassen sich die Ausfallwahrscheinlichkeit respektive die rechnerische Komponentenausfallrate ermitteln.

Durch die Berücksichtigung von Streuungen in der Berechnung lässt sich die Informationstiefe von Standardberechnungsaufgaben deutlich vergrößern. Informationen zur Ausfallrate können ein wesentlicher Indikator bei der Beurteilung eines Konstruktionsstandes sein. Die Ableitung von Struktursensitivitäten ermöglicht die Wichtung von Einflüssen, so dass bei Bedarf eine zielgerichtete und effiziente Verbesserung auch von komplexen Strukturen oder Systemen möglich ist.

Beide vorgenannte Punkte ermöglichen letztendlich das Aufstellen von direkten Zusammenhängen zwischen Fertigungsaufwand und Produktzuverlässigkeit, also zwischen Qualität und Herstellungskosten.

Die angesprochenen Analysen können zu einem sehr frühen Zeitpunkt in der Entwicklung erfolgen. Im Unterschied zu Weibull-basierten Analyseverfahren sind zur Robustheits- oder Zuverlässigkeitsanalyse keine Versuchsergebnisse oder Felddaten erforderlich. Damit entfällt auch prinzipiell die Fragestellung nach der Serienrelevanz von Prototypen im Versuch; also danach, wie repräsentativ das Bauteilverhalten von Prototypen in entwicklungsbegleitenden Bauteilversuchen für den Serienbetrieb ist.

## 2 Vorgehensweise

Es stellt sich die Frage nach den Eingangsparametern, deren Streuungen in der Berechnung berücksichtigt werden können. Für FE-basierte Spannungsanalysen interessiert vor allem Bauteilgeometrie, insbesondere lebensdauerbestimmende Detailgeometrie von Einstichen, Kerben oder Bohrungen in allen höher beanspruchten Teilen. Auch Belastungsdaten können beispielsweise als Folge von montagebedingten Einflüssen als streuende Parameter für die Berechnung vorausgesetzt werden.

Im Hinblick auf die Schädigungsanalyse nach dem Örtlichen Dehnungskonzept sind vor allem die festigkeitsbestimmenden zyklischen Werkstoffdaten (Chargeneinfluss), aber auch Oberflächenbeschaffenheiten als Folge der gewählten Fertigungsverfahren oder Randschichteigenspannungen von Einsatzstählen als Folge einer durchgeführten Wärmebehandlung im Fokus.

Im Hinblick auf die Beurteilung von Bauteilen nach Festigkeitskriterien lassen sich mehrere Grenzwerte definieren. Direkt aus den Ergebnissen der FE-Analyse können die Kurzzeitfestigkeit oder die Dauerfestigkeit durch den Abgleich mit Grenzwerten für die Dehnungen bzw. Spannungen beurteilt werden.

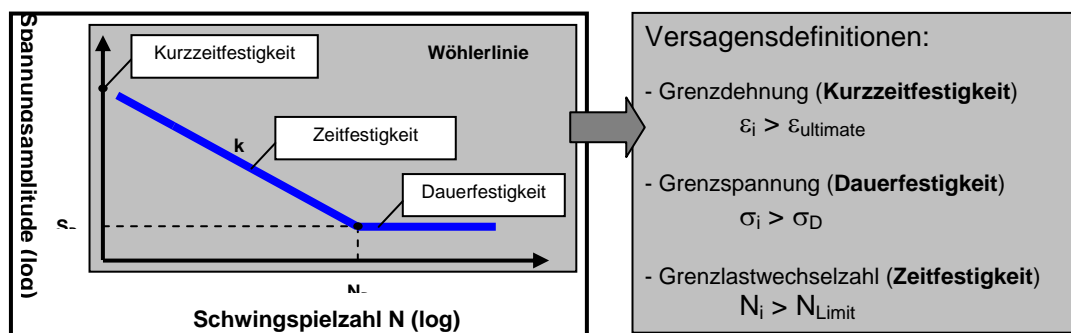


Abbildung 2: Definition festigkeitsrelevanter Grenzzustände

Da aus Gewichtsgründen Bauteile üblicherweise nicht mehr dauerhaft ausgelegt werden, ist eine Beurteilung der Zeitfestigkeit respektive der ertragbaren Lastwechsel eines Bauteils notwendig. Das setzt jedoch eine Kopplung von FE-basierter Spannungs- und Schädigungsanalyse voraus.

In der nachfolgenden Grafik ist der Berechnungsablauf für die Durchführung einer Robustheits- oder Zuverlässigkeitsanalyse dargestellt.

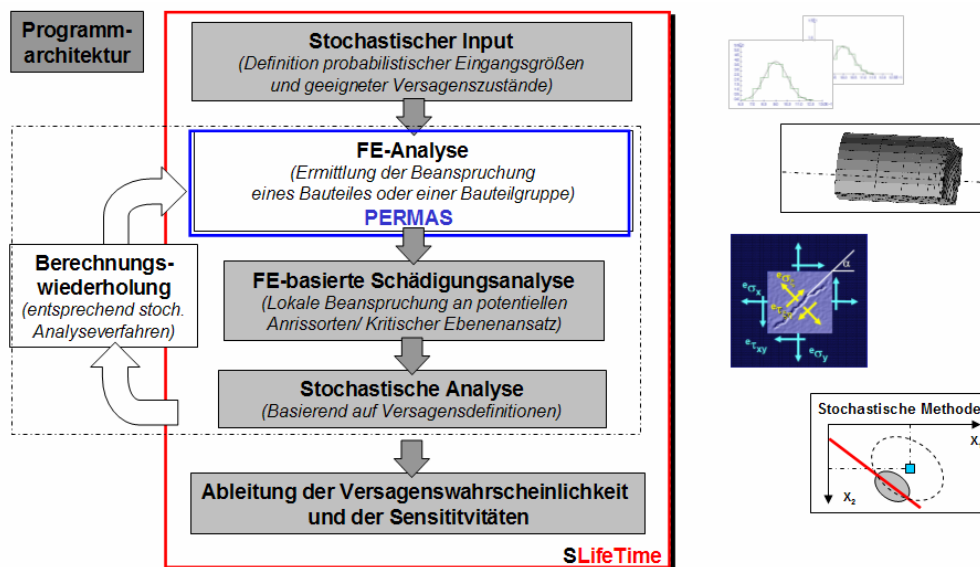


Abbildung 3: Prinzipieller Berechnungsablauf

Da je nach Wahl des stochastischen Analyseverfahrens und Anzahl der variablen Eingangsgrößen die Anzahl an wiederholten Berechnungsläufen beträchtlich sein kann, ist es erforderlich, einen möglichst effizienten Berechnungsablauf zu gestalten. Das wird sichergestellt, indem möglichst wenig verschiedenartige Softwareprodukte integriert werden und somit nur wenige I/O-intensive Schnittstellen bedient werden müssen.

Die FE-Analyse erfolgt mit Permas von Intes. Die nachgeschaltete FE-basierte Schädigungsanalyse wird mit SLifeTime von ZF durchgeführt, wobei das Programm in die Umgebung des Stochastik-Solvers Slang implementiert wurden, um einen effizienten Berechnungsablauf zu gewährleisten.

### 3 Anwendungsbeispiel

Als Anwendungsbeispiel dient eine Ritzelwelle. Die Ritzelwelle wird im Hinterachsdifferential eines PKW's eingesetzt. Gelagert wird die Welle über ein Kegellager- und ein Nadellager.

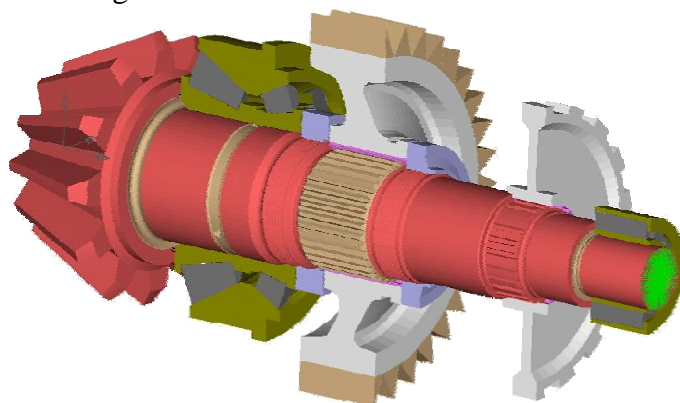


Abbildung 4: Anwendungsbeispiel PKW-Ritzelwelle

Die Belastung wird über das Stirnrad in die Welle eingetragen und über den Ritzelkopf auf ein Tellerrad zur Hinterachse weitergeleitet. Die Welle wird durch die Zahnkräfte nichtproportional auf Umlaufbiegung und Torsion beansprucht. Interessant aus konstruktiver Sicht sind die Wellenmutter zur Vorspannung bzw. Fixierung des Kegelrollenlagers und des Stirnrades.

#### FE-basierte Spannungsanalyse

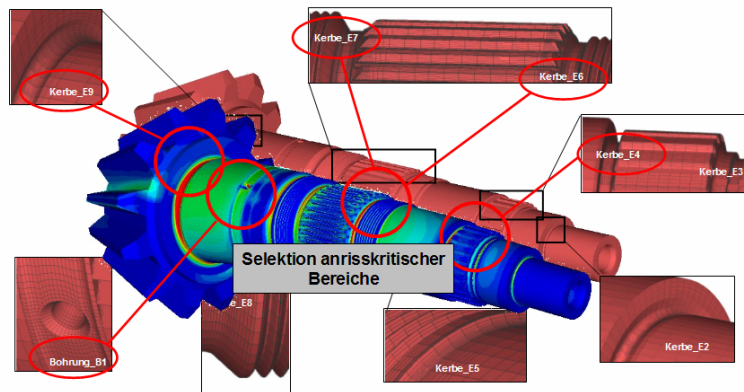


Abbildung 5: Spannungsanalyse potentiell kritischer Bereiche

Lebensdauerkritisch sind formal alle Wellenabsätze, Kerben oder Bohrungen, da diese spannungsüberhöhend wirken. Die übliche Berechnungsaufgabe besteht darin, FE-basiert Spannungszustände für relevante Lastfälle abzuleiten und basierend auf einem Lastkollektiv mittels Schädigungsanalyse eine Lebensdauerausage zu treffen.

#### Schädigungsanalyse nach dem Örtlichen Konzept (Eigenentwicklung SLifeTime)

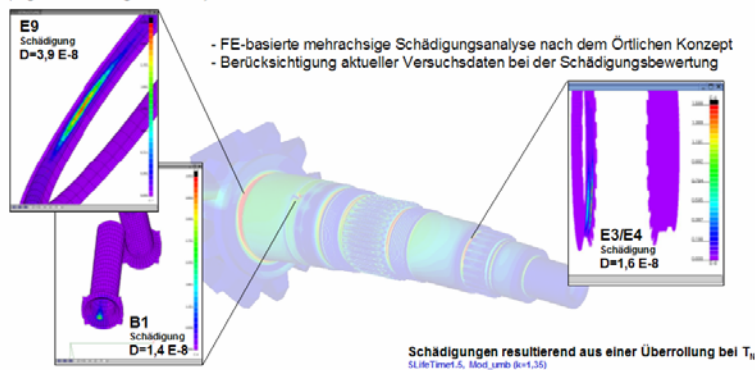


Abbildung 6: Selektion lebensdauerkritischer Bereiche

Soll die Aufgabe in Hinblick auf die Ermittlung von Sensitivitäten oder einer Ausfallrate erweitert werden, sind ergebnisrelevante Eingangsparameter zu definieren. Unter Berücksichtigung einer durchgeführten Schädigungsrechnung wurden vier potentielle Ausfallorte der Welle lokalisiert und im Weiteren betrachtet.

Für diese werden jeweils die Oberflächenbeschaffenheit in Form der Rauhtiefe und die Randeigenspannungen als variable Größen der Berechnung zugeführt. Damit stehen 8 Basisvariablen fest. Die 9. Basisvariable soll die Wellenmutter-

vorspannkraft sein, die je nach Montageverfahren deutlich variieren kann. Als Grenzwerte dienen lastfallweise vorliegende Vorgaben der zu erreichenden Lastwechsel. Ein Überblick über die angenommenen Kenngrößen erfolgt in Abbildung 7. (Für eine „plastischere Darstellung“ der Zusammenhänge wurden die Eingangswerte, das betrachtete Lastniveau sowie die Lastwechselvorgaben und damit auch die rechnerische Ausfallrate verzerrt.)

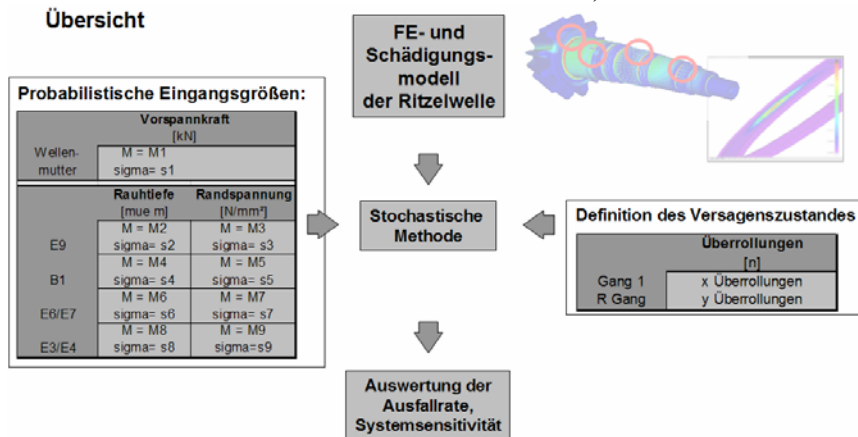


Abbildung 7: Überblick Berechnungsaufgabe

Im Ergebnis der Zuverlässigkeitsanalyse kann die Versagenswahrscheinlichkeit der betrachteten Welle mit den vorausgesetzten Randbedingungen für den Gang1 mit 245ppm und für den Rückwärtsgang mit 714ppm angegeben werden. Abbildung 8 veranschaulicht das Strukturverhalten (rechnerisch ertragbare Lastwechsel) in Abhängigkeit einer variablen Randeigenspannung bzw. Rauhtiefe für einen betrachteten Ausfallort. Danach steigen die rechnerischen Lastwechsel deutlich mit abnehmender Oberflächenrauhtiefe, also mit einer Verbesserung der Oberflächengüte an.

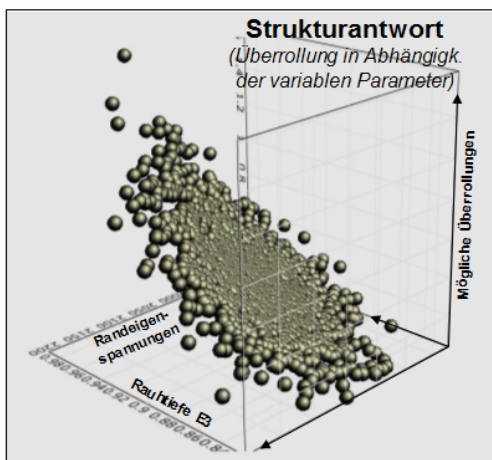


Abbildung 8: Strukturantwort

Nach Durchführung der Sensitivitätsanalyse kann die Korrelation der Eingangsgrößen mit der Ergebnisgröße (rechnerische Lastwechselzahl) in Form einer Korrelationsmatrix visualisiert werden. Die Korrelationskoeffizienten variieren üblicherweise zwischen  $-1,0 < K_{ij} < 1,0$ .

Nehmen die Koeffizienten betragsmäßig Werte größer 0.7 an, handelt es sich um signifikante Einflussgrößen bzw. das System reagiert empfindlich auf eine Variation des entsprechenden Parameters.

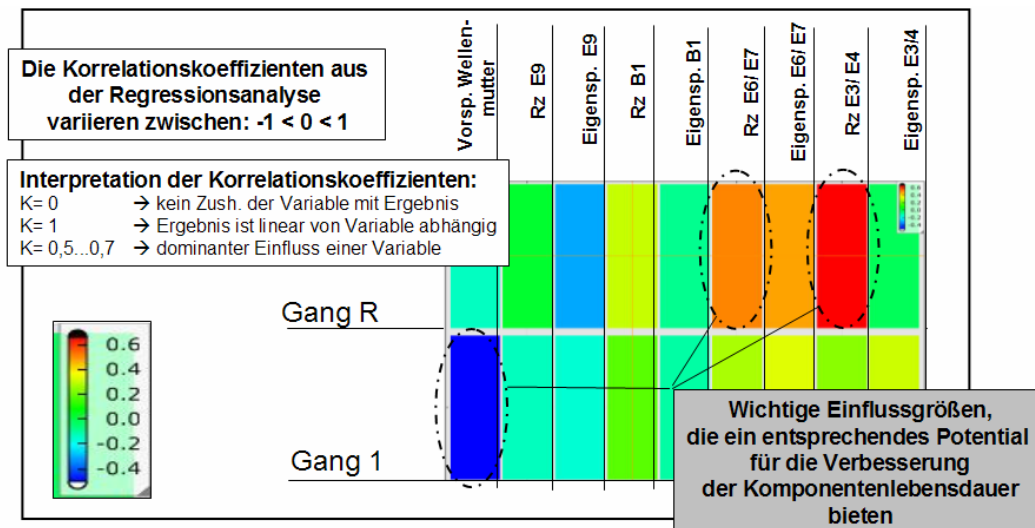


Abbildung 9: Korrelationen/ Wichtigkeit der Einflussparameter

Für das behandelte Beispiel kann die Korrelationsmatrix für die untersuchten Lastfälle angegeben werden. Danach sind im Rückwärtsgang insbesondere die Rauhtiefen der Kerben E6/E7 und E3/E4 dominant, wobei im 1.Gang die Vorspannkraft der Wellenmutter die Lebensdauer maßgeblich bestimmt.

## 4 Zusammenfassung

Durch die Berücksichtigung von Streuungen in der Berechnung lassen sich ohne Feld- oder Versuchsdaten Bauteile bzw. Bauteilgruppen hinsichtlich ihrer Zuverlässigkeit beurteilen (*Virtuelle Qualitätssicherung*).

Die Integration der Schädigungsanalyse in den Berechnungsablauf ermöglicht die Berücksichtigung von lastniveau- und lastwechselabhängigen Festigkeitseigenschaften.

Neben Aussagen zur Bauteilzuverlässigkeit lassen sich wichtige Einflussgrößen für eine Verbesserung des Bauteilverhaltens bestimmen. Mit vorgenannten Informationen können Fertigungsaufwand und erreichbarer Benefit hinsichtlich der Produktqualität unmittelbar in Zusammenhang gebracht werden. Voraussetzung hierfür ist jedoch eine genaue Kenntnis der statistischen Eigenschaften der Eingangsgrößen.

## 5 Referenzen

Die Sensitivitäts- und Zuverlässigkeitsanalysen wurden mit dem Programm SLang – The Structural Language durchgeführt:

Bucher, C., V. Bayer, O. Huth, D. Roos, J. Riedel, and Y. Schorling (2002).  
SLang - The Structural Language. User Manual. Institute for Structural  
Mechanics: Bauhaus-University Weimar.