

Stochastische Betriebsfestigkeit

Gunther Wehr¹, Fabrice Umbdenstock¹

¹ ZF Friedrichshafen AG

Zusammenfassung

Die stetige Verkürzung von Entwicklungszeiten, die Erweiterung von Produktpaletten und die zunehmende Gewichtsoptimierung von Komponenten zwingt zu "neuen" Beurteilungskriterien bei der Produktentwicklung.

Durch Kopplung stochastischer Methoden mit numerischen Simulationstechniken lassen sich für die Konstruktion und Auslegung von Bauteilen und Bauteilgruppen wichtige Informationen, wie Struktursensitivitäten oder die Systemzuverlässigkeit ableiten.

Diese Aussagen können bereits zu einem frühen Stadium der Produktentwicklung (vor Prototypenbau, Versuch) getroffen werden.

Keywords: Zuverlässigkeit, Bauteile, Bauteilgruppen, Antriebsstrang

1 Einleitung

ZF entwickelt und produziert Antriebs- und Lenksysteme sowie Fahrwerktechnik für die Automobilindustrie, Marine und Luftfahrt. Ein Schwerpunkt bei der Auslegung bildet dabei die Beurteilung der Betriebsfestigkeit von Systemkomponenten.

Der Nachweis von Bauteilen und Baugruppen hinsichtlich ihrer Funktionsfähigkeit und Lebensdauer erfolgt im Allgemeinen auf deterministischem Weg. Zahlreiche Einflussparameter unterliegen jedoch einer nicht zu vernachlässigenden Streuung. Vor dem Hintergrund, dass Bauteile zunehmend formoptimiert und damit hinsichtlich ihrer Tragfähigkeit und Lebensdauer ausgereizt werden, gewinnt die Frage nach einer zuverlässigen Auslegung von Komponenten des Antriebsstranges, von Lenk- oder Fahrwerkskomponenten an Bedeutung.



Abbildung 1: Applikationen von ZF Produkten

Simulationsbasierte Zuverlässigkeitsanalysen werden durch Kopplung der FEM mit stochastischen Methoden ermöglicht. Zu einem sehr frühen Zeitpunkt in der Produktentwicklungsphase (vor dem ersten Prototyp) können Aussagen zur Versagenswahrscheinlichkeit bzw. Robustheit des betrachteten Bauteils/ Baugruppe abgeleitet werden. Für derartige Untersuchungen sind keine Versuchs- oder Felddaten erforderlich.

Des Weiteren lassen sich Sensitivitäten der betrachteten Strukturen gegenüber den einzelnen Einflussparametern ableiten, so dass ein Ranking der Einflüsse beispielsweise im Hinblick auf die Lebensdauer möglich wird. Damit können der Konstruktion wertvolle Ansätze für effiziente Verbesserungsmaßnahmen gegeben werden.

Für die stochastischen Analysen werden relevante Einflussparameter, wie zum Beispiel die Belastung, Geometrien oder Materialeigenschaften, nicht als deterministische, sondern als streuende Größen aufgefasst. Das setzt eine entsprechende Kenntnis der stochastischen Eigenschaften der Einflussparameter voraus, die beispielsweise anhand von Erfahrungswerten oder aus Datenbanken abgeleitet werden können. Es kann so ein unmittelbarer Zusammenhang zwischen der BauteilAuslegung, den zugehörigen Fertigungsverfahren und der Produktausfallwahrscheinlichkeit hergestellt werden.

2 Problembeschreibung und Diskussion relevanter Grenzzustände

Betrachtet man ein Fahrzeuggetriebe in seiner Gesamtheit, dann sind geometrische Schwankungen bei der Bauteilfertigung, Materialstreuungen, Montagetoleranzen, aber auch Toleranzen im Wärme- und Schmierstoffhaushalt, die Zuverlässigkeit von Elektronikbauteilen und insbesondere Schwankungen hinsichtlich der Nutzeranforderungen für einen störungsfreien Betrieb relevant.

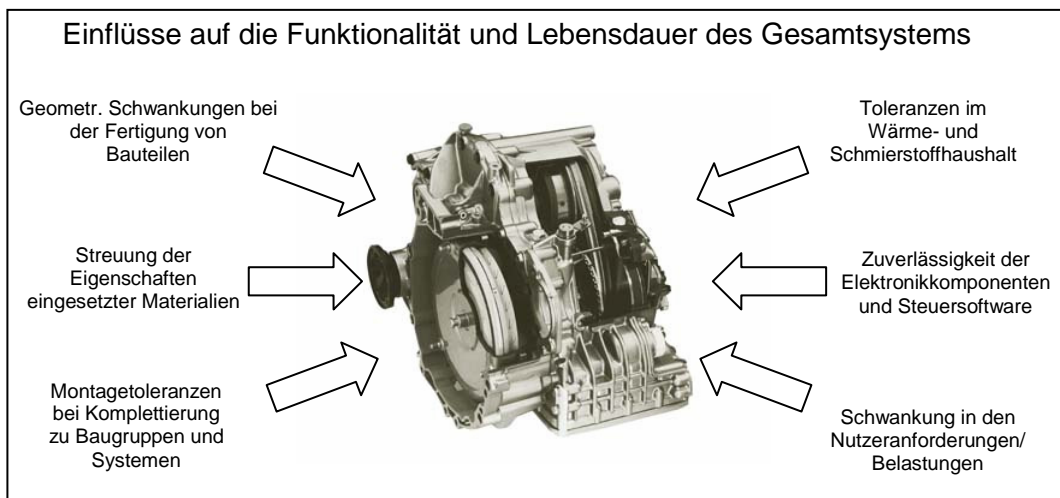
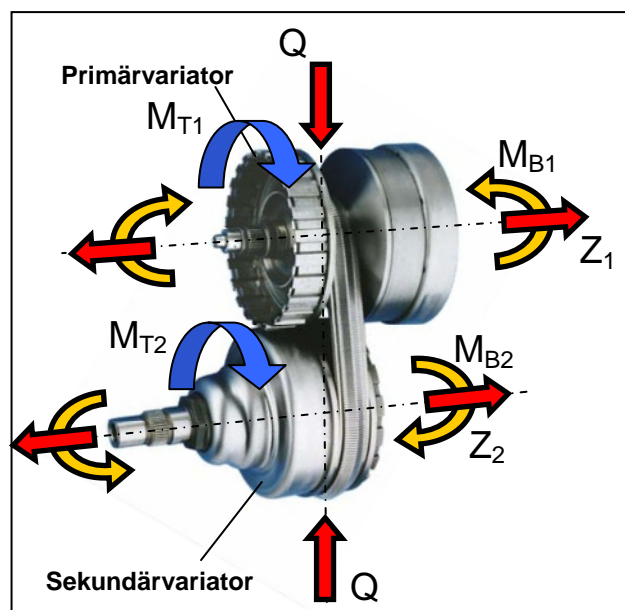


Abbildung 2: Einflüsse auf Zuverlässigkeit im Betrieb am Beispiel eines stufenlosen Automatengetriebes

Ein solches System stellt sich für eine gesamtheitliche Zuverlässigkeitsanalyse derzeit als zu komplex dar. Sinnvoll ist es daher, einzelne zuverlässigkeitsrelevante Komponente zu extrahieren und separat zu analysieren.

Beispielhaft kann der Variator eines stufenlosen Automatengetriebes als eine solche Komponente (vgl. Abb. 3) aufgefaßt werden. Der Variator besteht im Wesentlichen aus zwei kegelförmigen Scheibensätzen, zwischen denen eine Kette läuft. Durch die Änderung der Scheibenstellung gelingt es, die Übersetzung des Motormomentes stufenlos zu variieren.

Abbildung 3: Variator eines stufenlosen Automatengetriebes



Der Variator ist eine hoch beanspruchte Komponente. Auf die Variatorwellen wirken neben den Torsionsmomenten aufgrund der Umschlingung durch die Kette auch Querkräfte und Biegemomente. Die axiale Änderung der Scheibenposition erfolgt hydraulisch, so daß die Wellen zusätzlich durch axiale Abstützkräfte belastet werden. Für eine Aussage zur Zuverlässigkeit einer Baugruppe stellt sich die Frage nach relevanten Einflußgrößen. Neben der äußeren Belastung hat die Kerbgeometrie und damit die mit ihrer Herstellung verbundene Streuung Einfluß auf die Betriebsfestigkeit. Die geometrische Gestaltung von Einschnitten (vgl. Abb. 4) und Bohrungen bestimmt wesentlich den Spannungszustand des Bauteils. Für die Abbildung der streuenden Kerbgeometrie innerhalb der Zuverlässigkeitsanalyse ist ein Shape-morphing der FE-Geometrie erforderlich.

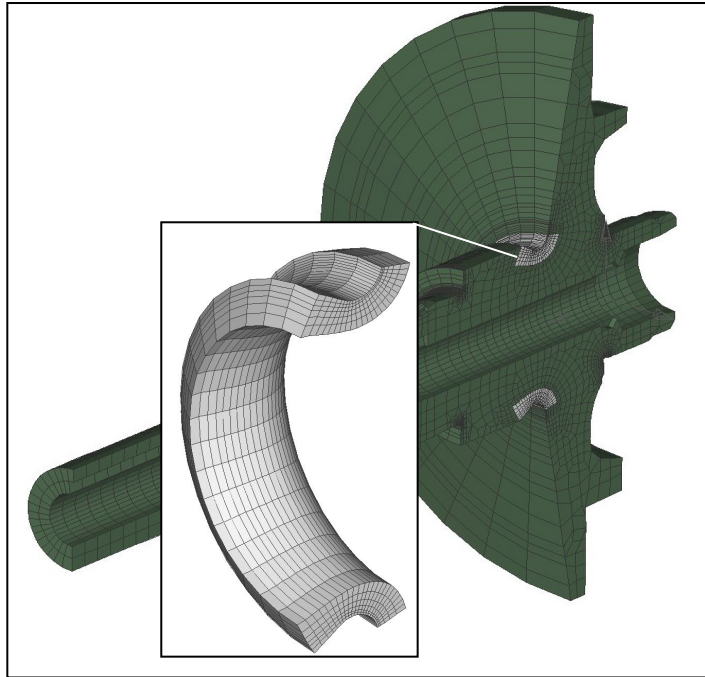


Abbildung 4: Scheibenauslauf der Variatorwelle

Interessant im Hinblick auf die Betriebsfestigkeit ist die Frage nach relevanten Grenzzuständen. Betrachtet man die Wöhlerlinie eines metallischen Werkstoffes, erkennt man drei charakteristische Festigkeitseigenschaften, die Kurzzeit-, Dauer- und Zeitfestigkeit (vgl. Abb. 5).

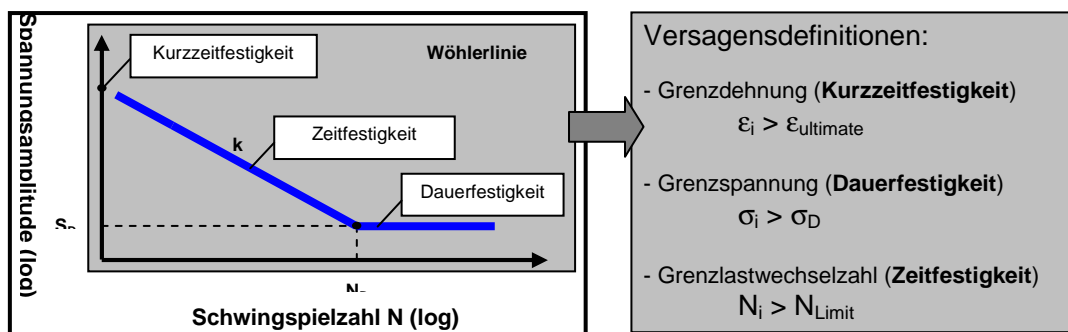


Abbildung 5: Betriebsfestigkeitsrelevante Grenzzustände

Anhand einer FE-Analyse lassen sich die Kurzzeitfestigkeit und die Dauerfestigkeit durch die berechneten Größen ϵ und σ direkt beschreiben. Wichtiger für die praktische Auslegung ist jedoch die Definition von Grenzschwingspielzahlen.

Diese setzt eine Kopplung von FE-Berechnung und Schädigungsanalyse voraus. Nachfolgende Grafik (Abb. 6) gibt einen Überblick über die Berechnungsaufgabe.

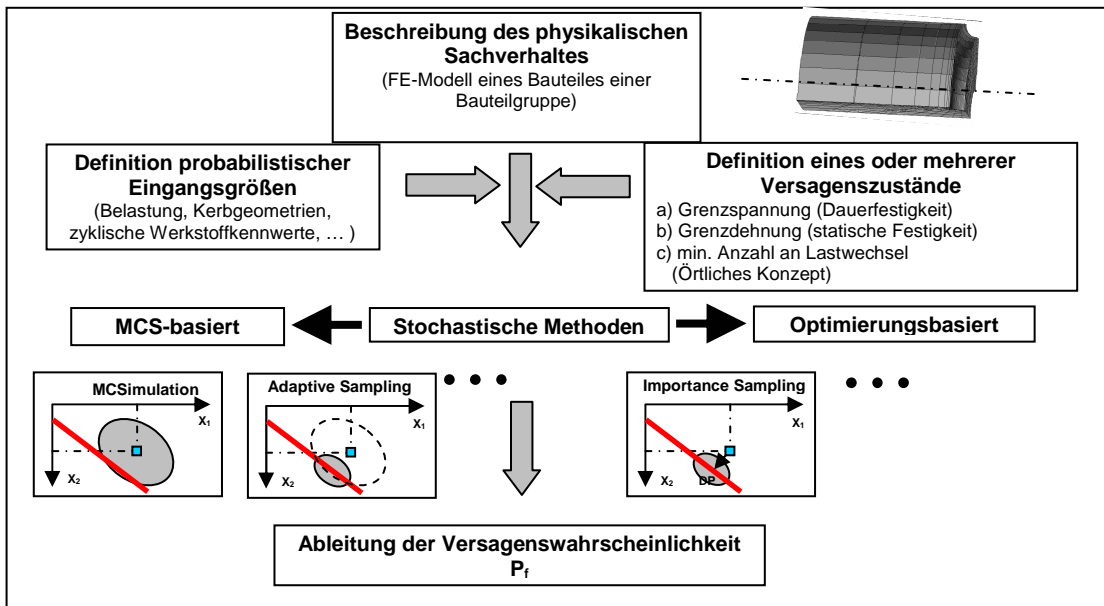


Abbildung 6: Allgemeiner Berechnungsablauf bei einer Zuverlässigkeitsanalyse

Der physikalische Sachverhalt wird durch ein FE-Modell dargestellt. Neben den streuenden Eingangsgrößen werden relevante Grenzzustände definiert. Durch Anwendung geeigneter stochastischer Methoden lassen sich die Versagenswahrscheinlichkeit sowie Systemsensitivitäten ableiten.

3 Zuverlässigkeitsanalyse am Bsp. einer Variatorwelle

In Abbildung 8 wird das Berechnungsbeispiel einer Variatorwelle vorgestellt. Relevante Einflußgrößen auf die Zuverlässigkeit (Basisvariable) sollen neben drei Belastungsgrößen die Kerbgeometrie des Scheibenauslaufes sein. Die Eingangsgrößen werden als normalverteilt vorausgesetzt und durch Mittelwert und Streuung definiert. Die Eingangsgrößen wurden dabei so gewählt das ein Zuverlässigkeitsniveau (Ausfallwahrscheinlichkeit) in der Größenordnung 10^{-4} erreicht wird.

Im Vorfeld wurden bereits Untersuchungen zur Anwendbarkeit und Effizienz der in SLang zur Verfügung stehenden stochastischen Methoden durchgeführt. Eine Auswahl der untersuchten Methoden wird in Abbildung 7 dargestellt.

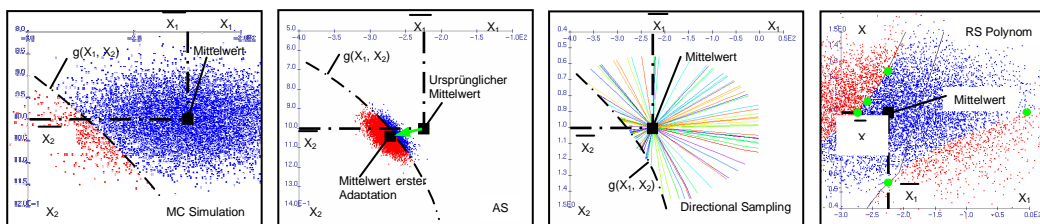


Abbildung 7: Ausgewählte Stochastische Methoden

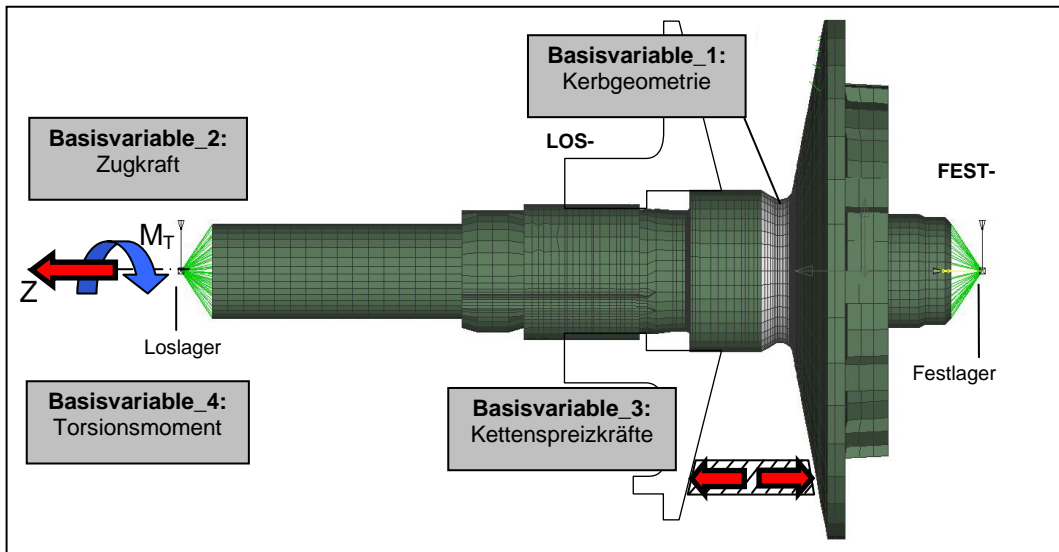


Abbildung 8: Zuverlässigkeitsanalyse am Prinzipbeispiel Variatorwelle

Ausgehend von den so gesammelten Erfahrungen kommen drei Verfahren, das Adaptive Sampling, das Directional Sampling und die Response Surface Methode zur Anwendung.

Im Ergebnis der Zuverlässigkeitsanalyse konnte die Ausfallwahrscheinlichkeit basierend auf den einzelnen Analysemethoden mit einem Fehler kleiner 5% ermittelt werden. Im Diagramm der Abbildung 9 wird der relative Fehler über die Anzahl an durchgeführten numerischen Simulationen (FE-Berechnungen) dargestellt. In nebenstehender Tabelle (Abb. 9) wird die Anzahl an erforderlichen Simulationen für eine tolerierbare Ergebnisgenauigkeit (Fehler kleiner 5%) angegeben.

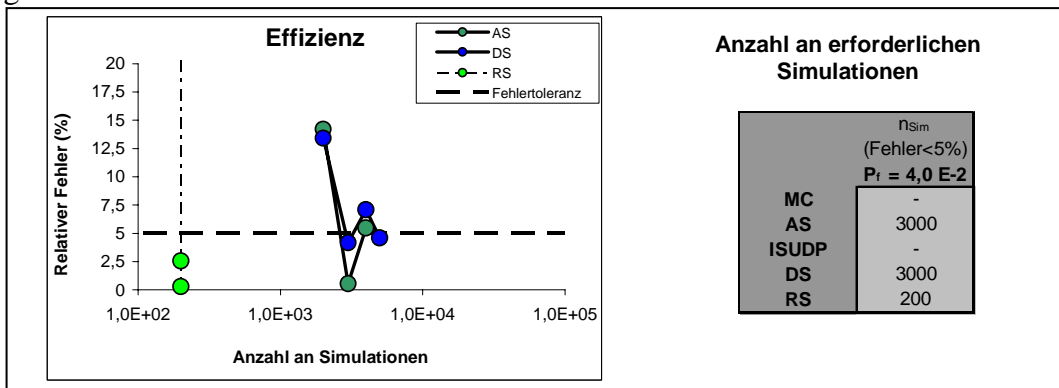


Abbildung 9: Effizienz der untersuchten stochastischen Methoden

Danach stellt die Response Surface Methode innerhalb des untersuchten Problems das effizienteste Verfahren dar. Das Adaptive Sampling und Directional Sampling führen ebenfalls zum Ziel, sind jedoch erheblich aufwendiger. Letztgenannte Verfahren erfordern in etwa die gleiche Anzahl an FE-Simulationen.

4 Zusammenfassung

Die stetige Verkürzung von Entwicklungszeiten, die Erweiterung von Produktpaletten und die zunehmende Gewichtsoptimierung von Komponenten zwingt zu "neuen" Beurteilungskriterien bei der Produktentwicklung.

Durch Kopplung stochastischer Methoden mit numerischen Simulationstechniken lassen sich für die Konstruktion und Auslegung von Bauteilen und Bauteilgruppen wichtige Informationen ableiten:

- Sensitivitäten (Wichtung von Einflüssen)
- Zuverlässigkeit (Ausfallrate als Qualitätskriterium)

Diese Aussagen können bereits zu einem frühen Stadium der Produktentwicklung (vor Prototypenbau, Versuch) getroffen werden.

5 Ausblick

Für die Beurteilung der Zeitfestigkeit ist die Kopplung von stochastischer FEA und Schädigungsanalyse notwendig. Dann sind Aussagen über Zusammenhänge zwischen Fertigungsaufwand und der Produktzuverlässigkeit ableitbar. Entsprechende Aktivitäten werden derzeit von ZF in Zusammenarbeit mit Dynardo angestellt.

Die Optimierung von Strukturen könnte/sollte perspektivisch mit stochastischen Analysen gekoppelt werden, um ein robustes Design zu erreichen.

6 Referenzen

Die Zuverlässigkeitsanalysen wurden mit SLang durchgeführt.