



# Rolls-Royce

## Einsatz probabilistischer Methoden in der Praxis am Beispiel von Triebwerken

W.-H. Friedl, M. Weißschuh

Rolls-Royce Deutschland Ltd & Co KG

© 2008 Rolls-Royce Deutschland Ltd & Co KG

The information in this document is the property of Rolls-Royce and may not be copied or communicated to a third party, or used for any purpose other than that for which it is supplied without the express written consent of Rolls-Royce.

This information is given in good faith based upon the latest information available to Rolls-Royce, no warranty or representation is given concerning such information, which must not be taken as establishing any contractual or other commitment binding upon Rolls-Royce or any of its subsidiary or associated companies.

# Einführung

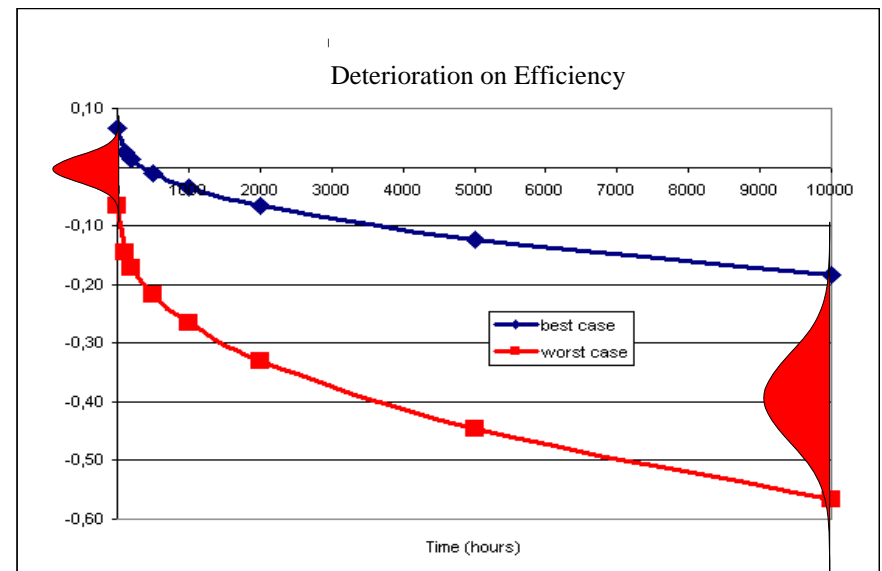
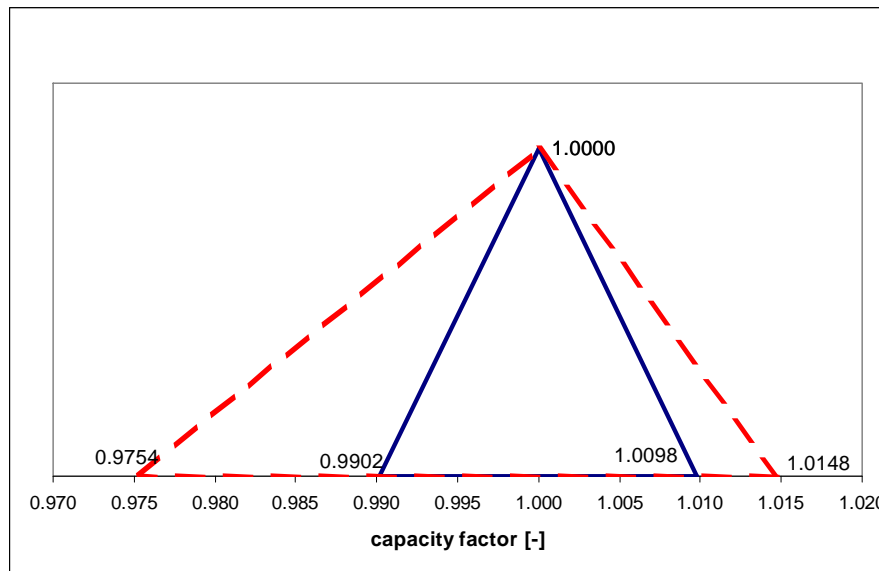
- Probabilistik wird in vielen Bereichen der Entwicklung und des Betriebs von Triebwerken eingesetzt
- Es erlaubt in der Produktgestaltung überflüssigen Konservatismus zu vermeiden, trotz steigendem Aufwand in der Auslegungsphase und in der Produktbetreuung
- Folgende Beispiele geben einen Auszug über die Anwendung der probabilistischen Methoden
  - REA
  - Lebensdauerberechnung
  - Service – (Zuverlässigkeit generell)
  - Sicherheit & Zuverlässigkeit – (Events)

# REA - Grundlagen

- Bei der REA (Random Engine Assembly) handelt es sich um eine Simulation, bei der Verhalten einer Flotte zufällig ausgewählter Triebwerke dargestellt wird.
- In der Triebwerksleistungsrechnung werden dabei Verteilungen der Eingabegrößen des Triebwerksmodells (z.B. Wirkungsgrade, geometrische Größen) berücksichtigt.
- Die REA liefert so genannte Design Inkremente, die je nach Betrachtung auf die Ergebnisse des nominalen Triebwerksmodells aufgeschlagen werden.
  - Development Margin
  - Production Scatter
  - Deterioration

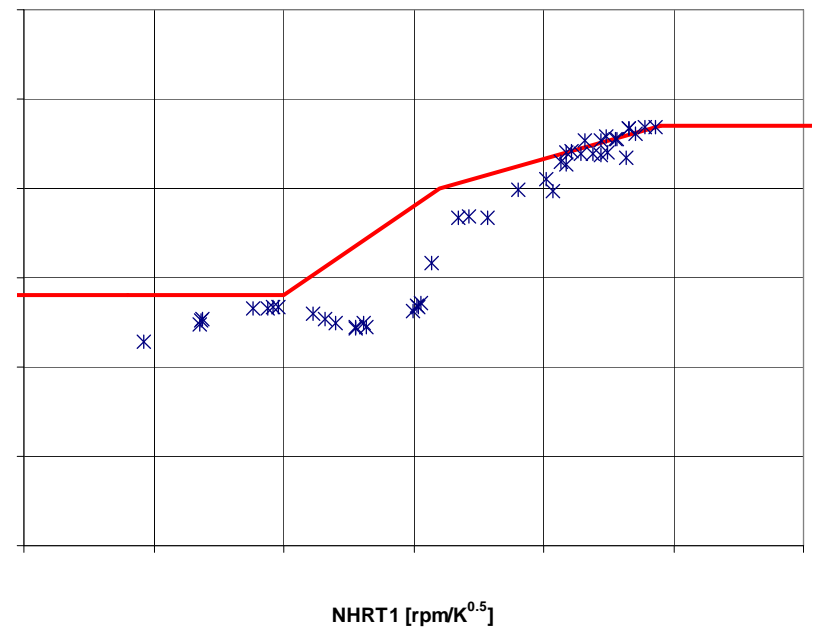
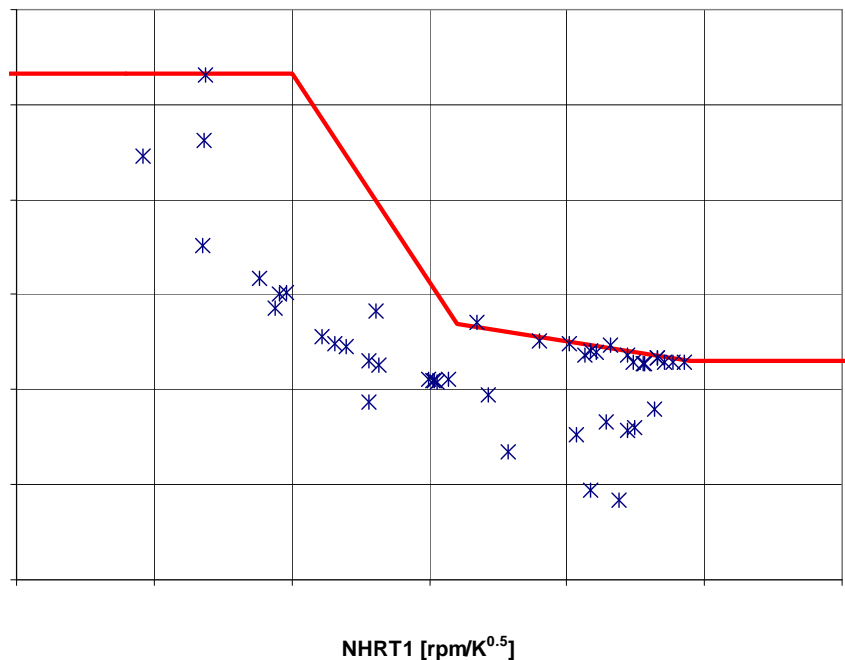
# REA - Eingabevertellungen

- Für alle relevanten Eingabeparameter werden von den Komponenten-  
abteilung Verteilungen anhand Erfahrung oder Datenbasis definiert



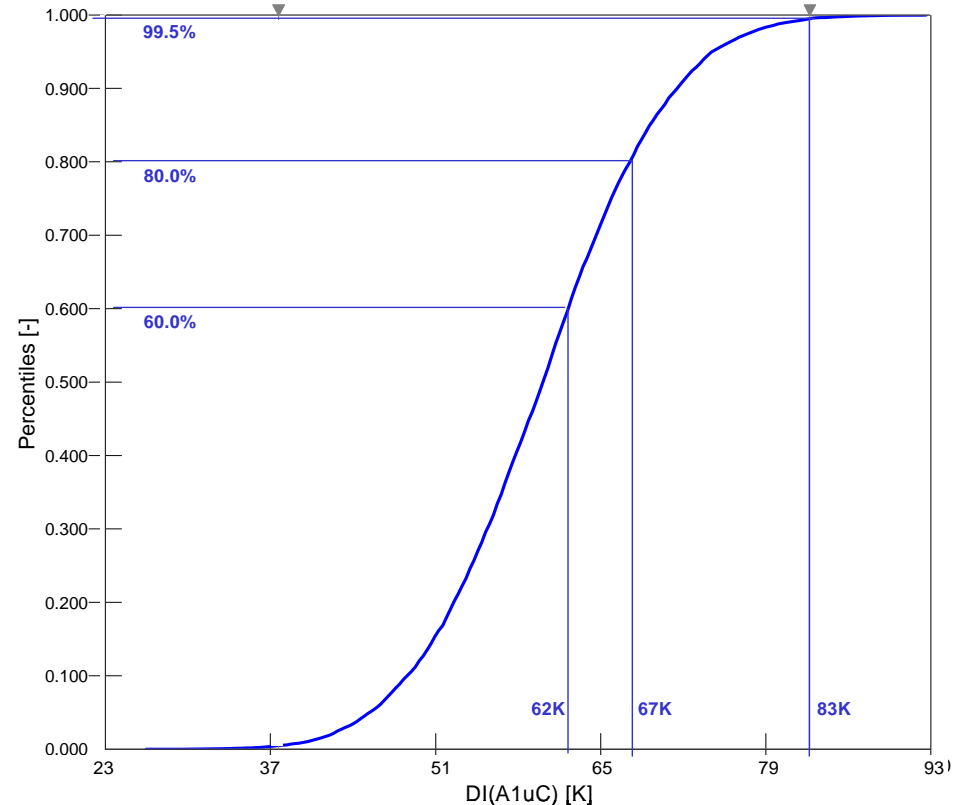
# REA – Design Inkremente

- Als Ergebnisse der REA können die Design Inkremente (DI) definiert werden, die innerhalb des Entwicklungsprozesses vorgehalten werden.
- Die DIs können für alle benötigten Leistungsparameter ausgegeben werden und werden meist über einem Parameter, der den Lastzustand des Triebwerks beschreibt, aufgetragen.



# REA - Ausgabeverteilungen

- Die REA liefert dann für alle relevanten Leistungsparameters eine Verteilung zum untersuchten Zeitpunkt
- Die Verteilung wird herangezogen, um die Zielwerte für die Zulassungstest (z.B. Type Test) zu definieren

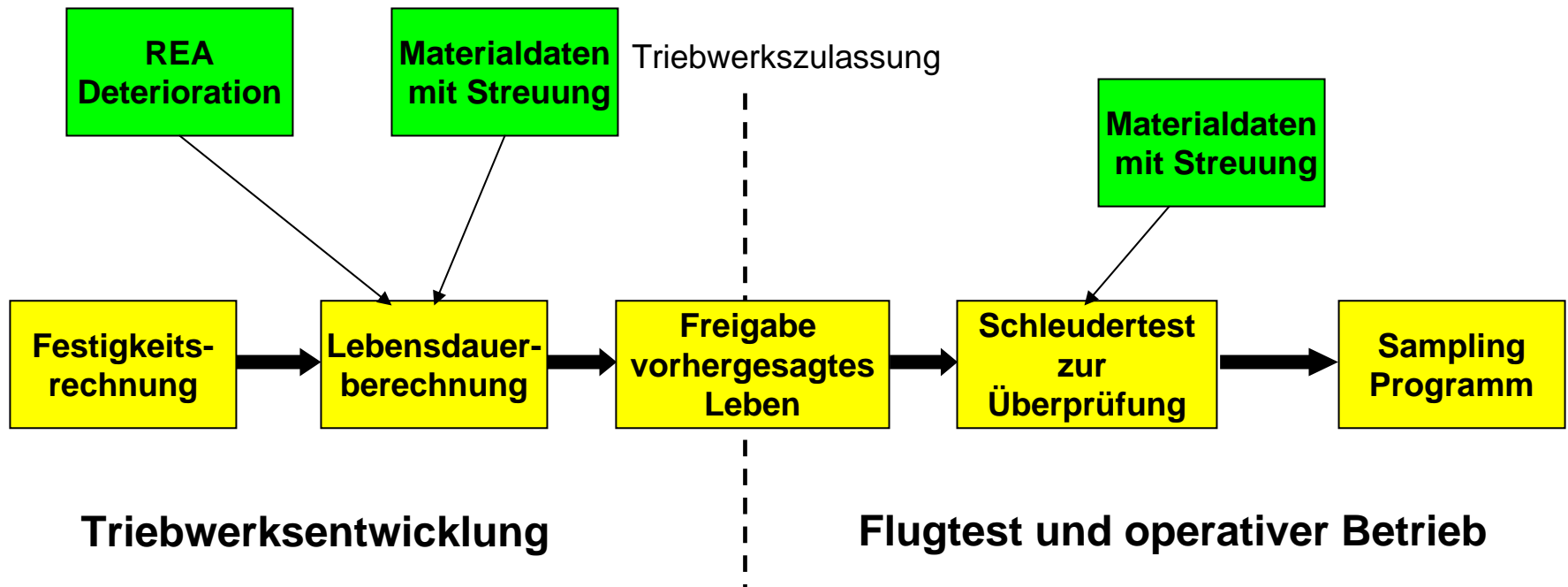


# Lebensdauerberechnung - Grundlagen

- Im Triebwerksbau haben die meisten Bauteile keine feste Lebensdauerbegrenzung
- Bauteile, deren Versagen zu sicherheitsrelevanten Folgen führen können, werden mit einer Lebensdauerbegrenzung versehen, innerhalb derer sie mit einer Wahrscheinlichkeit von 99.9999999% (Ausfallwahrscheinlichkeit  $10^{-9}$ ) nicht versagen dürfen.
- Bei diesen Bauteilen handelt es sich in der Regel um schwere, rotierende Bauteile (Scheiben, Wellen), deren Energie bei Versagen nicht innerhalb des Triebwerks aufgenommen werden kann.
- Die freigegebene Lebensdauer wird durch eine Reihe von Berechnungen und Tests über das gesamte Produktleben bestimmt und kontrolliert.

# Lebensdauerberechnung - Prozess

- Überblick über die Prozessschritte zur Lebensdauerfreigabe von lebensdauerbegrenzten Bauteilen
  - Probabilistische Eingabegrößen kommen aus der REA und den Materialdaten





# Service - Eingabedaten

- Das Triebwerksverhalten im Betrieb wird durch eine Simulation vorhergesagt. Dabei werden folgende Eingabeparameter berücksichtigt:
  - Ausfallgründe\* auf der Ebene des Triebwerksbetriebs:
    - Erreichen der Lebensdauergrenze entsprechender Bauteile
    - Zufällige Ereignisse, z.B. Vogelschlag
    - Verschleißmechanismen mit Auswirkung auf den Betrieb des Triebwerks, z.B. Schaufelspalte
  - Verschleiß von Bauteilen auf Ebene der Triebwerkswartung
    - Bauteilschädigungen, die zu Wartungsmaßnahmen führen ohne einen Einfluss auf den Betrieb des Triebwerks zu haben
  - Sekundärschäden
    - Beschädigungen, die durch Fremdeinwirkung entstehen und nicht durch Verschleiß im normalen Betrieb, z.B. Vogelschlag

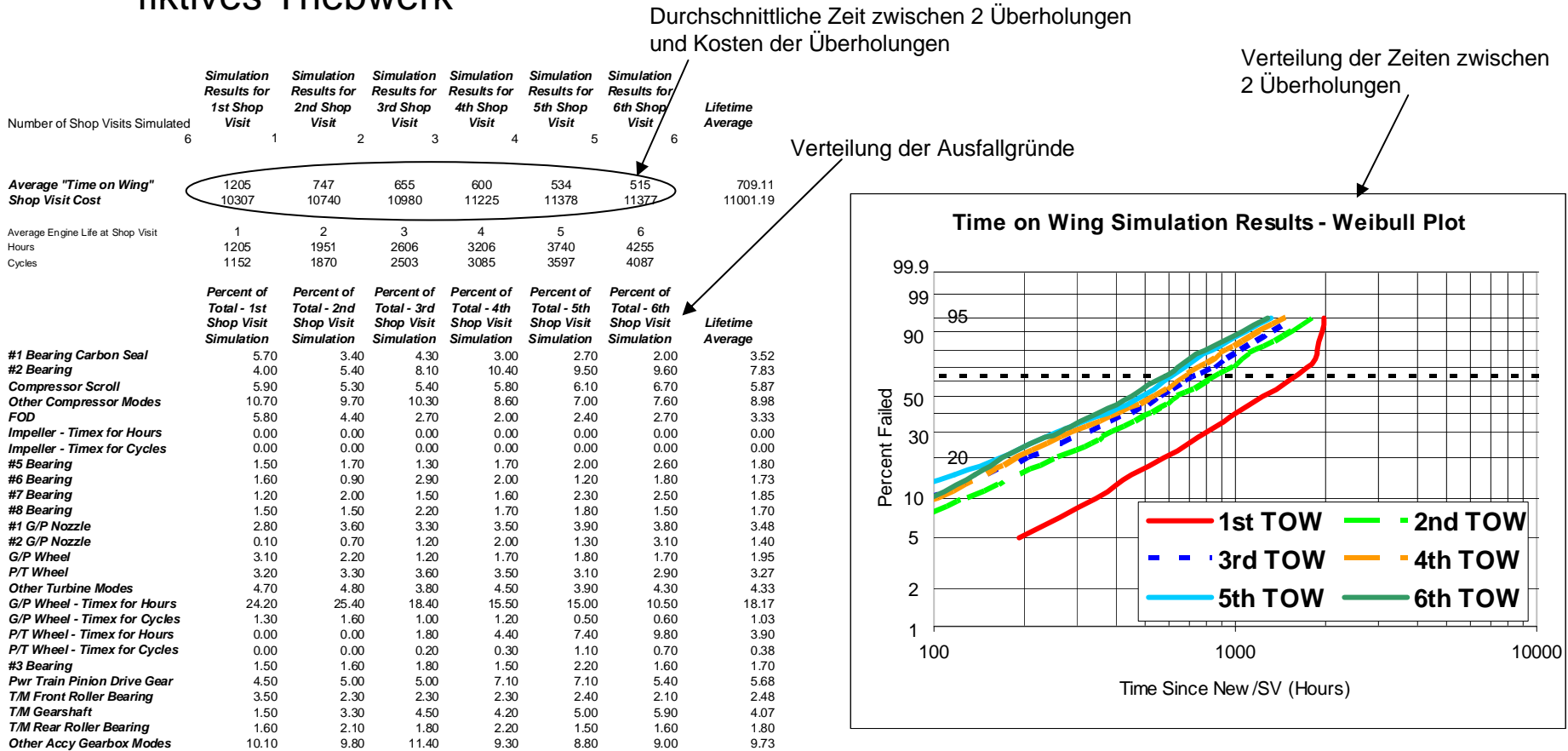
\* Jeder Zustand, bei dem das Triebwerk vom Betreiber nicht für den weiteren Betrieb akzeptiert und vom Flügel genommen wird

# Service - Modellaufbau

- Das Modell für die Triebwerkssimulation wird mit Daten aus dem Betrieb gefüttert
  - Ausfallgründe auf Triebwerksebene
    - Triebwerksdaten (Alter, Betreiber, Anzahl der Wartungen)
    - Kategorisierung nach Ausfallursache
  - Wartungsbedürftigkeit auf Bauteilebene
    - Triebwerksdaten (Alter, Betreiber, Anzahl der Wartungen)
    - Kategorisierung der Bauteilabweichungen gegenüber Wartungshandbuch
    - Bauteilalter
- Weibullanalysen für Vorkommnisse mit betriebsspezifischem Verschleißmechanismus
  - Sekundärschäden werden ausgeklammert und separat erfasst
- Ausfallraten für andere Vorkommnisse

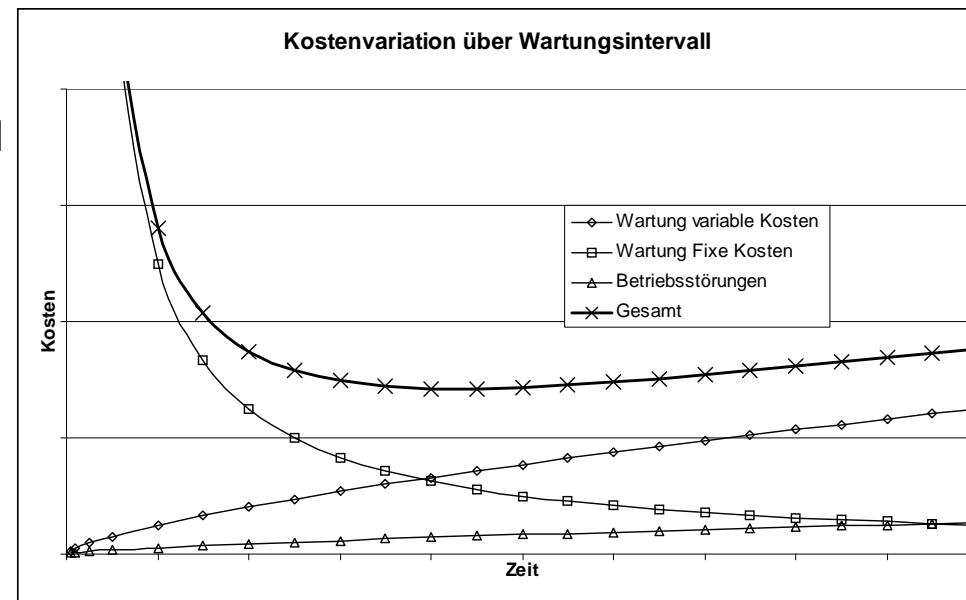
# Service – Ergebnisse Simulation

- Beispiel für typische Ergebnisse der Triebwerksmodellrechnungen für ein fiktives Triebwerk



# Service – Optimierungsansätze

- Studien zur Optimierung des Betriebsverhaltens durch Änderung von
  - Bauteilkonstruktion
    - Verbesserung der Verteilung von Ausfallgründen
    - Eliminierung von Schadensmechanismen
  - Wartungsvorschriften
    - Wartungsumfang in Abhängigkeit des Ausfallgrundes
    - Softlives – Alter ab dem Wartung unabhängig vom äußerlichen Zustand des Triebwerks durchgeführt wird
  
- Auswirkungen auf
  - Triebwerkszuverlässigkeit
  - Wartungskosten
  - Störungen des Betriebs



# Zuverlässigkeit - Grundlagen

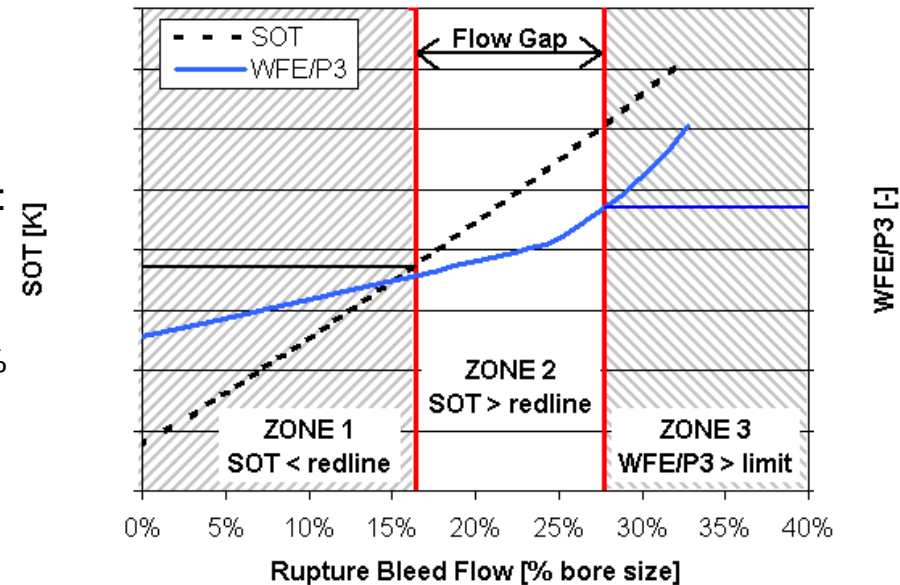
- Versagensfälle werden nach der Konsequenz kategorisiert
  - Katastrophal – Verlust des Fluggeräts
  - Kritisch – Zustände, bei denen die Steuerung des Fluggeräts eingeschränkt ist und das Risiko eines Verlusts besteht
  - Major&IFSD – Zustände, bei denen die Steuerung des Fluggeräts eingeschränkt ist ohne Risiko eines Verlusts

- Häufigkeitskategorien
  - Extremely remote <  $10e-9$
  - Remote <  $10e-7$
  - Occasional <  $10e-5$
  - Probable <  $10e-3$

Konsequenz	Ausfallwahrscheinlichkeit							
	$10^{-3}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$	$10^{-6}$	$10^{-7}$	$10^{-8}$	$10^{-9}$	$10^{-10}$
Katastrophal *	Red			Yellow		Yellow	Yellow	Green
Kritisch	Red		Yellow	Yellow	Yellow	Green		
Major & IFSD	Yellow	Yellow	Yellow	Green				

# Zuverlässigkeit - Anwendung

- Bei einem katastrophalen Fehlerfall (Bleed Pipe Rupture) ist die notwendige Ausfallrate nicht erreicht worden.
- Der Fehlerfall wurde deshalb weiter unterteilt:
  - **ZONE 1:** Bei Lochgrößen unter 16% der Querschnittsfläche stabilisiert das Triebwerk unterhalb der Redline SOT → **unkritisch**
  - **ZONE 2:** Bei Lochgrößen zwischen 16% and 28% der Querschnittsfläche stabilisiert das Triebwerk oberhalb der Redline SOT → **kritisch**
  - **ZONE 3:** Bei Lochgrößen über 28 % der Querschnittsfläche stabilisiert das Triebwerk auf einem WFE/P3 Limit und wird durch andere Kontrollmechanismen abgefangen → **unkritisch**



- Bei konservativer Annahme, dass sich die Lochgrößen bei dem Fehlerfall, gleichverteilt ergeben, kann die Ausfallrate mit dem Faktor 0.12 reduziert werden. Das kritische Ereignis ist dann extremely remote.