



## 1. Dresdner – Probabilistik - Workshop

# Probabilistische Beschreibung der Triebwerksalterung (Schwerpunkt Flugtriebwerke)

Dipl.-Ing. Friederike Gräter

Institut für Luftfahrtantriebe, Universität Stuttgart

Das Projekt wird innerhalb von OPTIFER - Lufo III vom BMWI gefördert (Förderkennzeichen 20T0306B).

Prof. Dr.-Ing. Stephan Staudacher  
Institut für Luftfahrtantriebe, Universität Stuttgart

Dr.-Ing. Matthias Weißschuh  
Rolls-Royce Deutschland Ltd & Co KG

Dresden, 10. Oktober 2008



# Agenda

**1. Einführung und Zielsetzung**

**2. Modellierung der Leistungsverschlechterung**

**3. Ergebnisse und Einsatzbereich**

**4. Zusammenfassung**



## Entwicklung der Triebwerksindustrie

- Hohe Anforderungen an Leistung und Zuverlässigkeit  $\leftrightarrow$  Geringe Kosten
  - Wartungs- und Instandhaltungsverträge zwischen Hersteller und Kunden
    - z. B. Total Care ...
    - vom Hersteller zum Dienstleister  $\rightarrow$  Instandhaltung gewinnt an Bedeutung
  - Lange Nutzungsdauern erfordern Betrachtung über Zyklen
  - Hochkomplexe Produkte  $\rightarrow$  multidisziplinärer Entwicklungsprozess wichtig
  - Derzeit keine Technologiesprünge  $\rightarrow$  Bestehendes kontinuierlich verbessern
- $\rightarrow$  Probabilistische Beschreibung der herstell- und betriebsbedingten Zustände einzelner Bauteile
- $\rightarrow$  Aussage über Veränderung der Leistungsparameter über die Zeit



## Ziel der probabilistischen Modellierung

- Merkmalsbasierte Vorhersage des Leistungsrückgangs
- Feststellen der Haupteinflussmerkmale
  - gezielte Verbesserung der einzelnen Bauteile
  - gezielte Instandhaltung (z.B. Online - Washing)
  - herstellen eines Bezugs zwischen Kosten und Nutzen
- Zurechtgeschnittene Leasing- bzw. Wartungsverträge mit den Betreibern
- Kalkulation der anfallenden Kosten und dem damit verbundenen Risiko



## Datenbasis der probabilistischen Modellierung

Merkmalsdaten mit Hilfe von

- Bauteiltoleranzen
- Produktionsdaten
- Expertenwissen / -schätzungen
- Theoretische Untersuchungen
- Ergebnisse von Bauteilvermessungen (gebraucht und neu)

Vergleich der Ergebnisse mit

- Performancedaten aus Abnahmeläufen
- Performancedaten aus dem EHM



# Agenda

**1. Einführung und Zielsetzung**

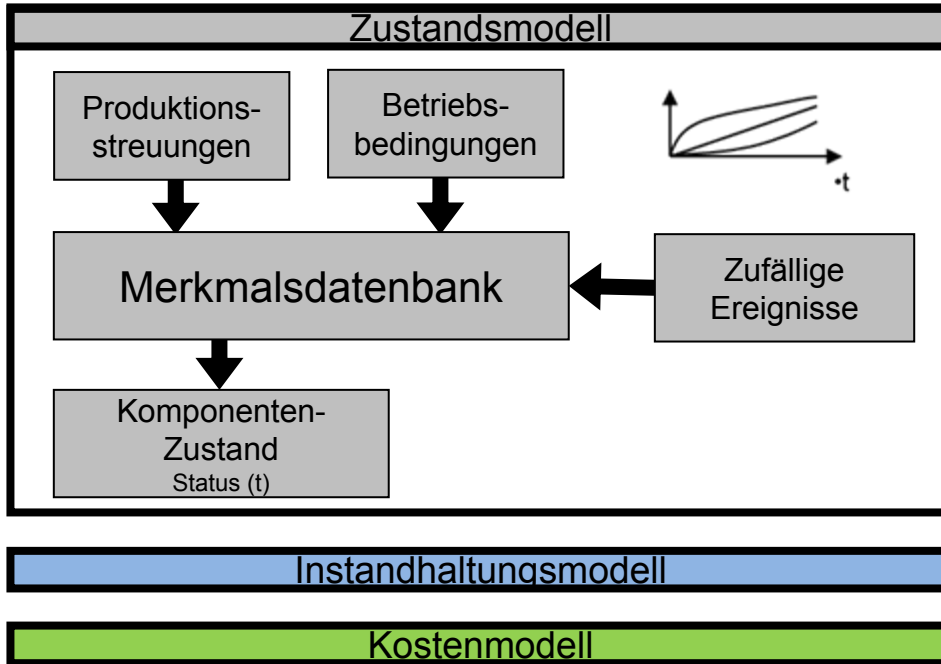
**2. Modellierung der Leistungsverschlechterung**

**3. Ergebnisse und Einsatzbereich**

**4. Zusammenfassung**



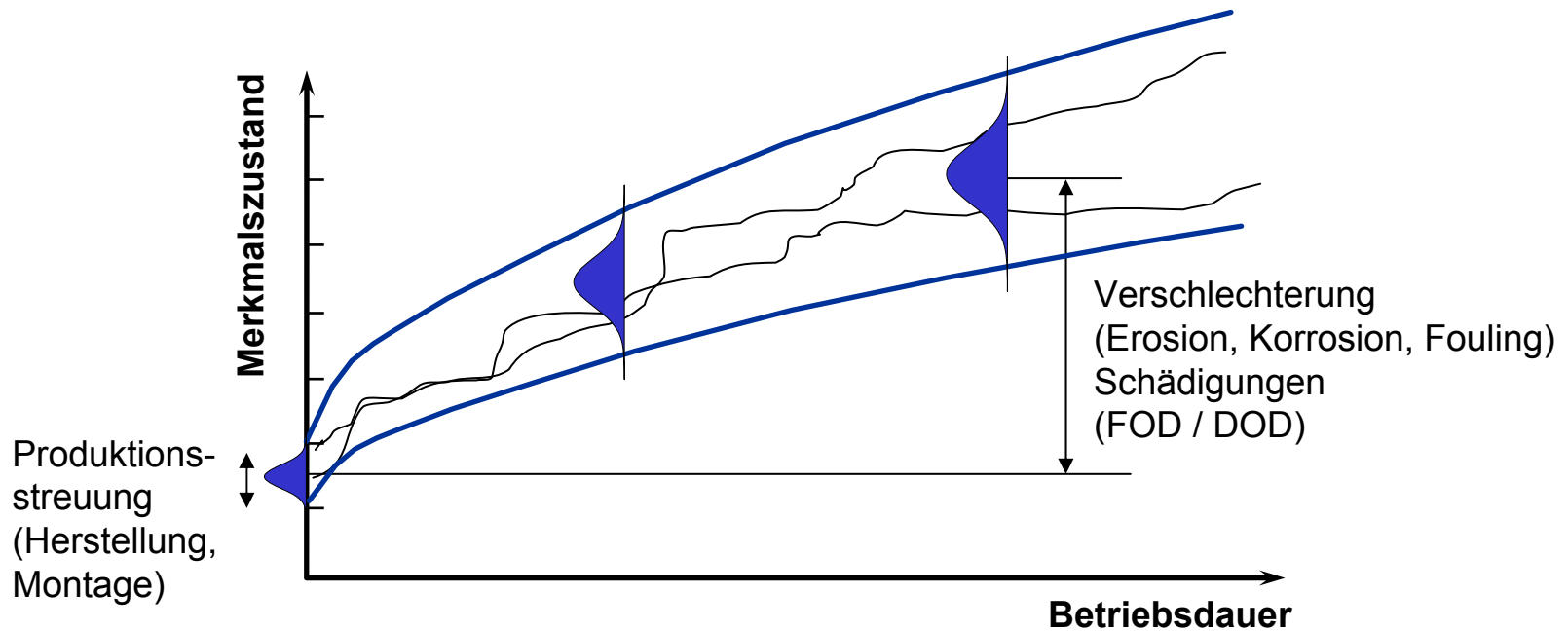
# Gesamtüberblick



Trendkurven für die globalen Leistungsparameter (SFC, TGT, T30, P30, NL, NH, ...)



**Triebwerkszustand = Produktionszustand + Betriebsbedingte Alterung**







## Produktionsstreuung

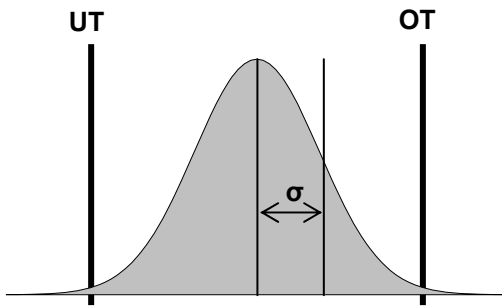
- Zeitpunkt  $t=0$
- Verteilungsfunktionen anhand der Toleranzgrenzen, den tatsächlich gemessenen Streuungen bei Bauteilen im Neuzustand und Einschätzungen von Fachexperten
- Streuung von Einzelteilen und ganzen Sets
- Prozessfähigkeitsparameter  $C_p$  als Quantifizierung der Streuung von Produktionsmerkmalen
- Abnahmeläufe als Vergleichsdaten (mit Korrektur der gemessenen Standardabweichung)



## Prozessfähigkeitsparameter

$C_p$  spiegelt den Zusammenhang zwischen den Toleranzgrenzen und der Standardabweichung wider.

Ein großer  $C_p$ -Wert bedeutet, dass nur wenige Teile außerhalb der Toleranzgrenzen liegen.



$$C_p = \frac{OT - UT}{6 \cdot \sigma}$$

Mit OT: Oberer Toleranzwert  
 UT: Unterer Toleranzwert  
 $\sigma$ : Standardabweichung



## Statistische Aufbereitung der Streuung aus den Abnahmeläufen

Die aus den Abnahmeläufen vorliegende Streuung  $\sigma_{\text{Abnahmelauf}}$  entspricht nicht der durch die Merkmalsänderungen abgeleiteten Streuung.

Daher:

Berücksichtigung von Messungenauigkeiten, die u. a. hervorgerufen werden durch

- Kalibrierung
- Sondenmontage
- Abweichung vom Betriebspunkt

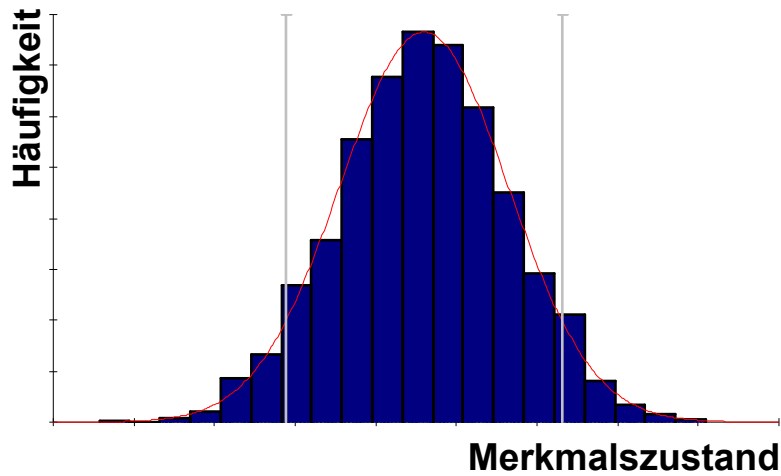
→  $\sigma_{\text{Messfehler}}$

Es ergibt sich somit als „wahre“ Streuung, die das Modell abbilden soll

$$\sigma_{\text{wahr}} = \sqrt{\sigma_{\text{Abnahmelauf}}^2 - \sigma_{\text{Messfehler}}^2}$$



# Merkmalsbeschreibung



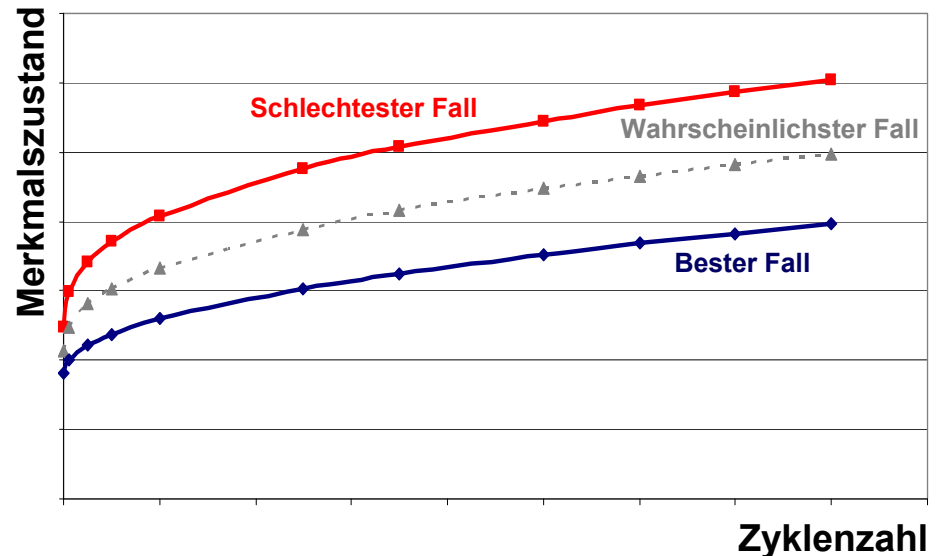
...zu einem bestimmten Zeitpunkt mittels einer Normalverteilung bzw. Dreiecksverteilung.

Zu jedem Zeitpunkt  $t$  gibt es eine vorgegebene Verteilung.

...über die Betriebsdauer in Zyklen über den Zusammenhang

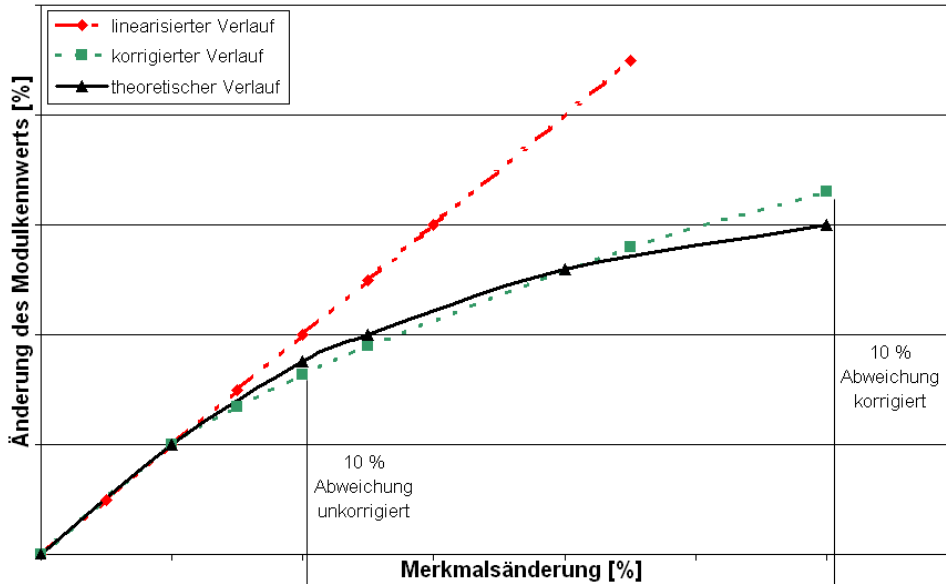
$$\Delta M = a + b \cdot t^c$$

jeweils für den besten, schlechtesten und wahrscheinlichsten Fall.





# Zusammenhang zwischen Merkmalsänderung und Modulkennggröße



## Allgemeine Formulierung:

$$\Delta Modul_1 = ex_{Mod1,M1} \cdot \Delta Merkmal_1$$

$\Delta Modul$  → Änderung der Modulkennggröße

$ex_{Mod1,M1}$  → Austauschrate

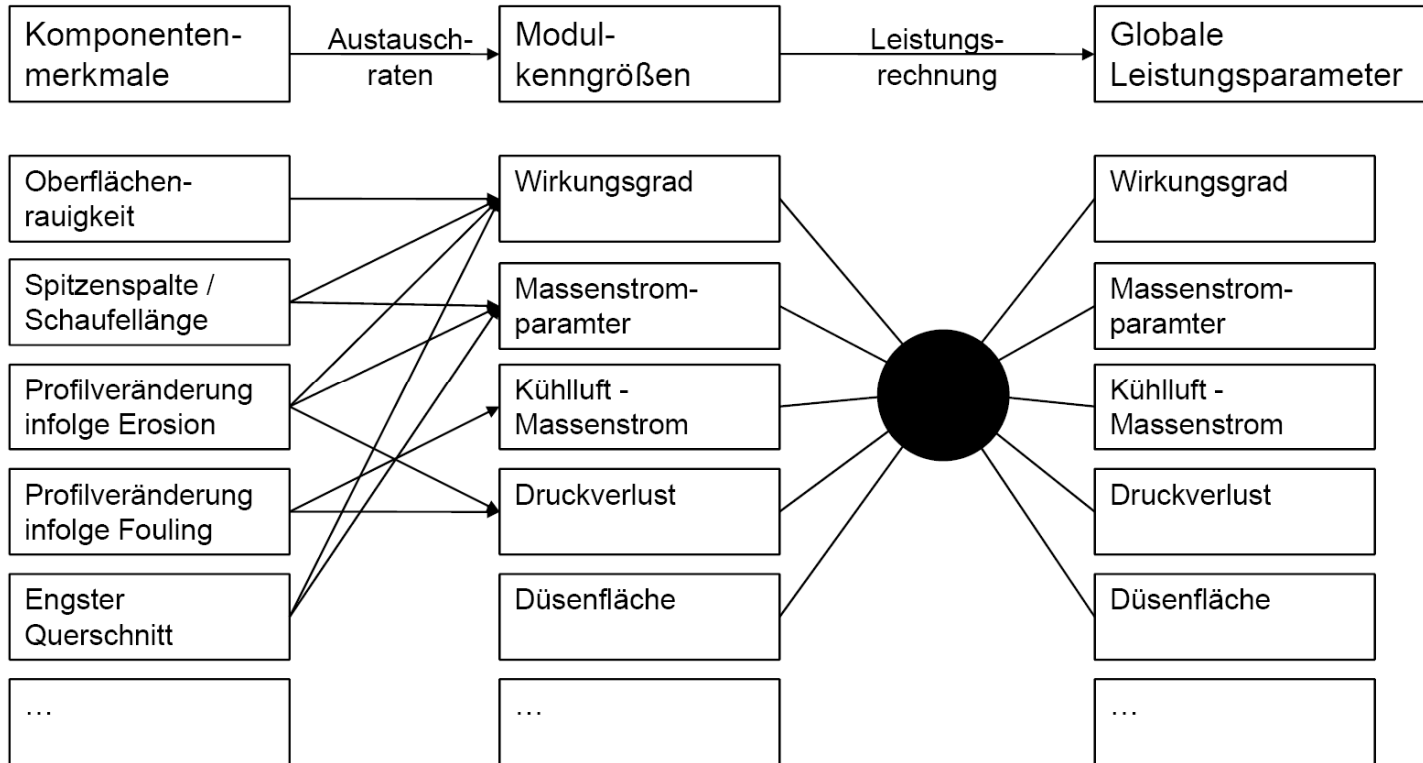
$\Delta Merkmal$  → Änderung des Merkmalzustands

← Korrektur des linearen Zusammenhangs, da Austauschraten nur für begrenzten Bereich gültig sind.

## Mathematische Beschreibung mittels Sensitivitätsparameter-Matrix:

$$\begin{pmatrix} \Delta Modul_1 \\ \vdots \\ \Delta Modul_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} ex_{Mod1,M1} & \dots & ex_{Mod1,Mn} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ ex_{Modm,M1} & \dots & ex_{Modm,Mn} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \Delta Merkmal_1 \\ \vdots \\ \Delta Merkmal_n \end{pmatrix}$$

# Modellstruktur





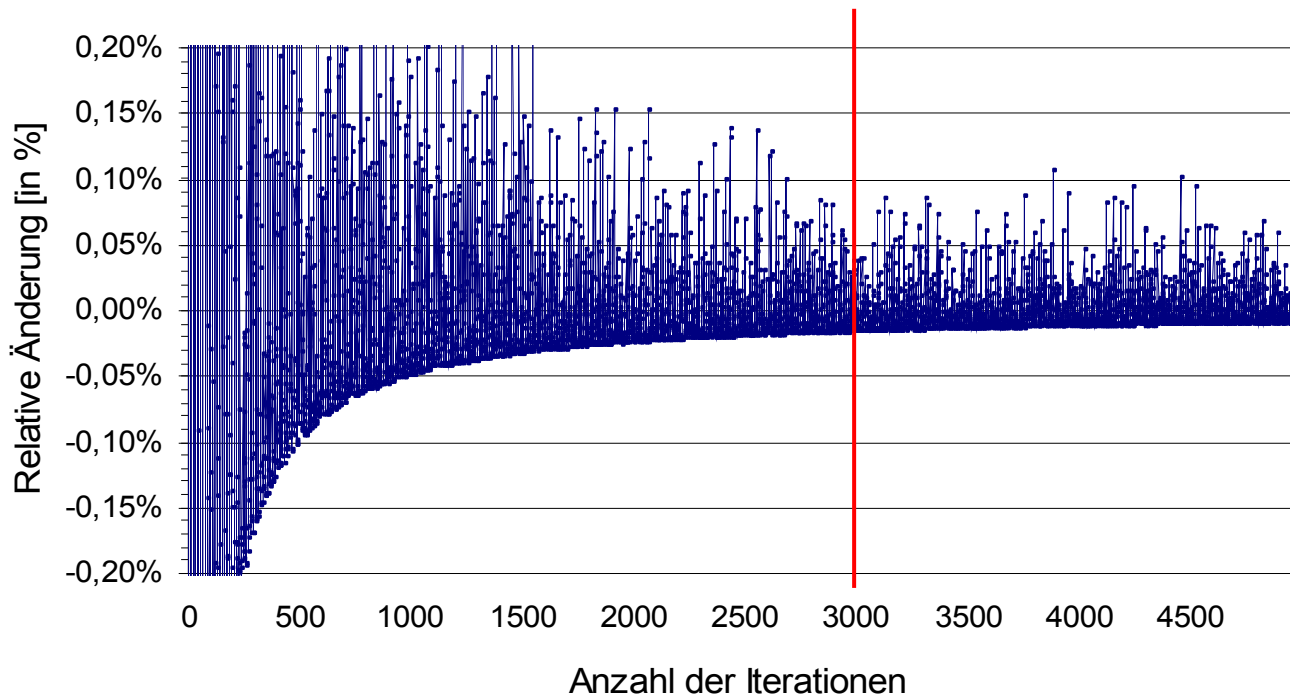
## Sampling – Monte Carlo Simulation

- Zu einem Zeitpunkt  $t$  wird für jedes Merkmal ein Zustand aus der vorgegebenen Verteilungsfunktion gewürfelt
- Für den jeweiligen Merkmalszustand wird über die passende Austauschrate der Einfluss auf die zugehörige Komponente berechnet ( $\Delta\eta$ ,  $\Delta\kappa$ )
- Mit Hilfe der Leistungsrechnung wird daraus die Änderung der Leistungsparameter ermittelt (SFC, TGT, ...)
- Dieses Vorgehen wird  $n$ -fach wiederholt  
(minimales  $n$  liegt über Konvergenzkriterium fest)



# Konvergenzkriterium

Nach einer Simulation von ca. 3000 Triebwerken sind die Verteilungsfunktionen der globalen Leistungsparameter ausreichend ausgebildet.







# Agenda

**1. Einführung und Zielsetzung**

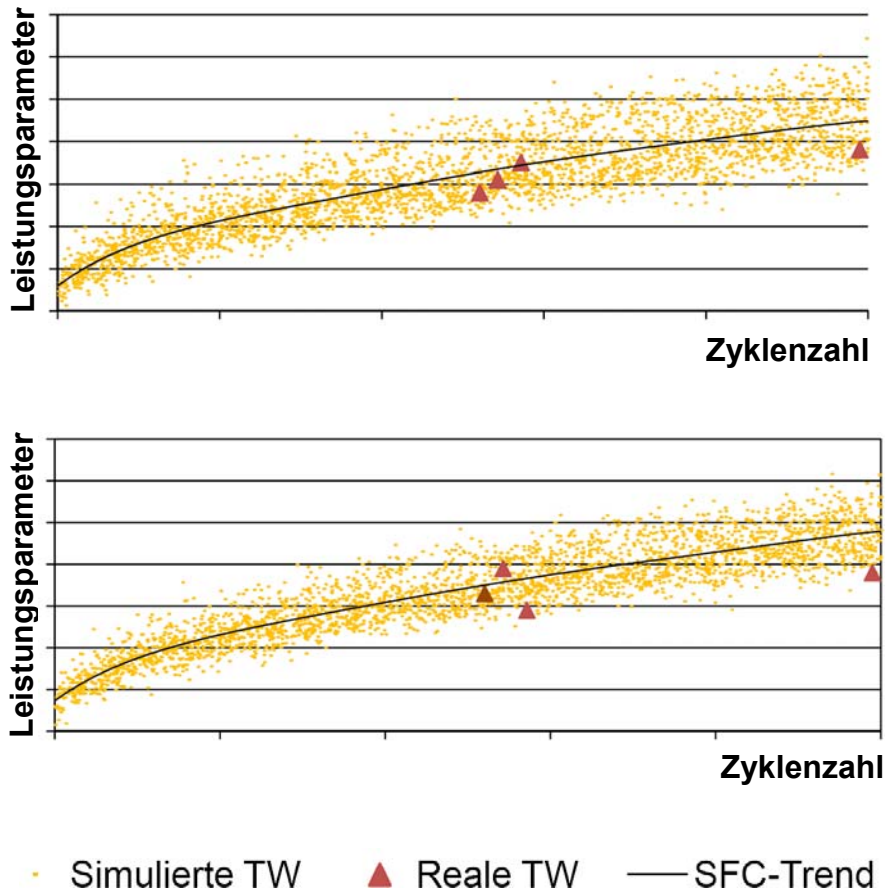
**2. Modellierung der Leistungsverschlechterung**

**3. Ergebnisse und Einsatzbereich**

**4. Zusammenfassung**



# Simulierter Verlauf eines globalen Leistungsparameters über der Zeit im Vergleich mit realen Triebwerksdaten

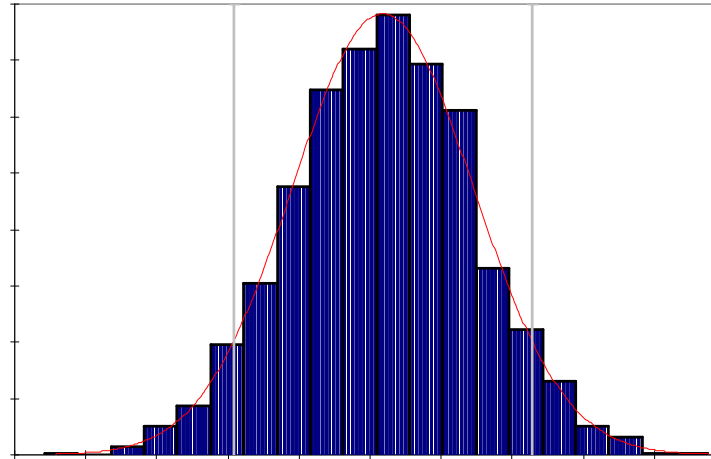


Die zur Verfügung stehenden Daten realer Triebwerke liegen innerhalb des simulierten Streubands.

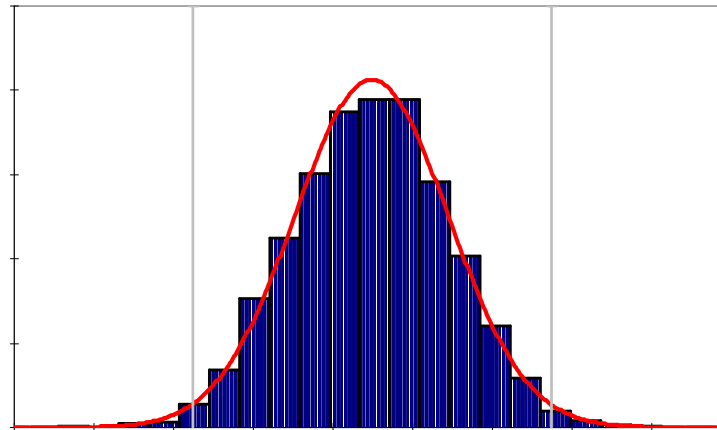


# Verteilung der globalen Leistungsparameter zu einem diskreten Zeitpunkt

TGT Verteilung



NL Verteilung



# Die einflussreichsten Merkmale

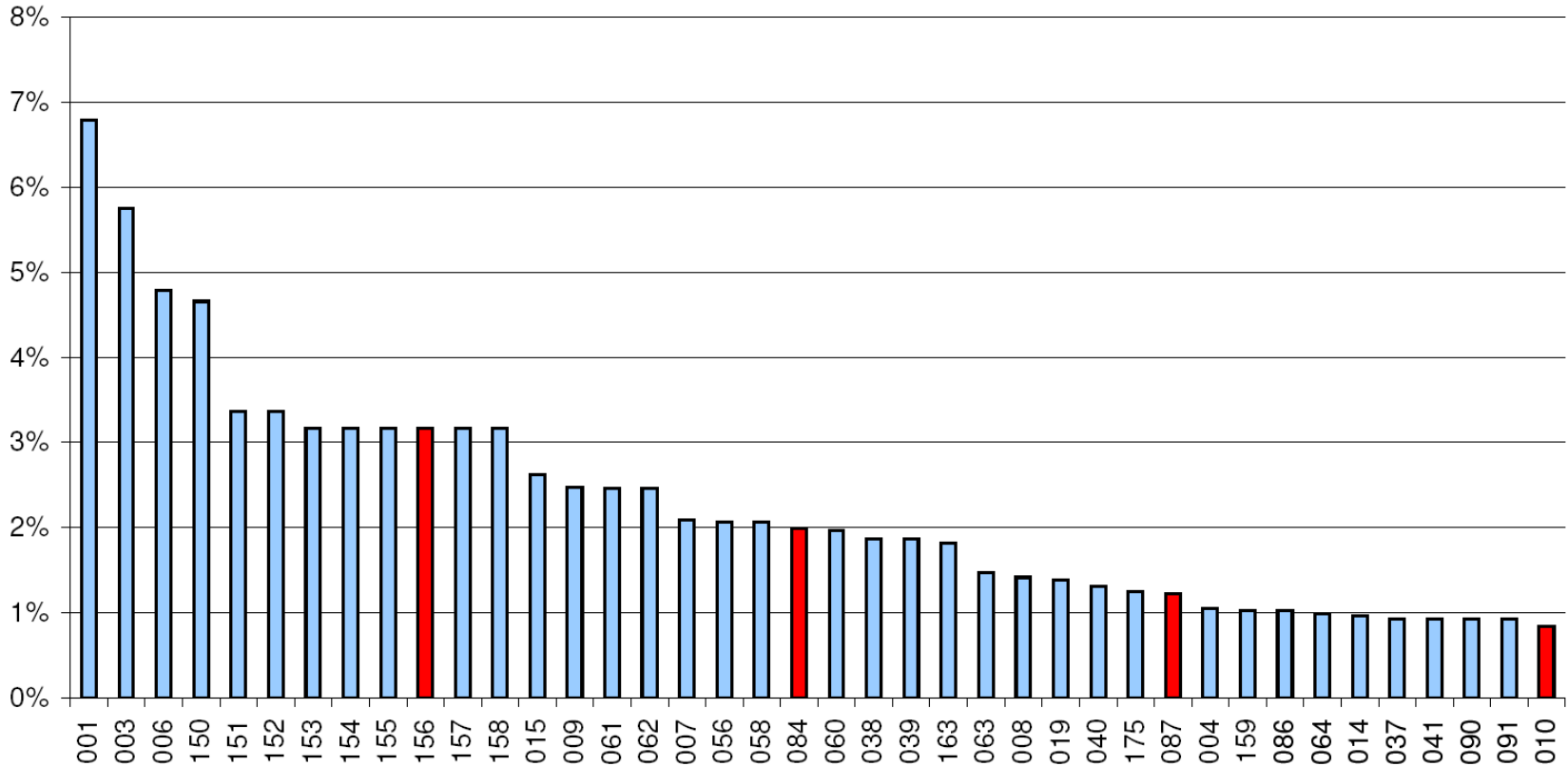


Abb.9: Merkmalseinfluss auf den SFC

# Die einflussreichsten Merkmale

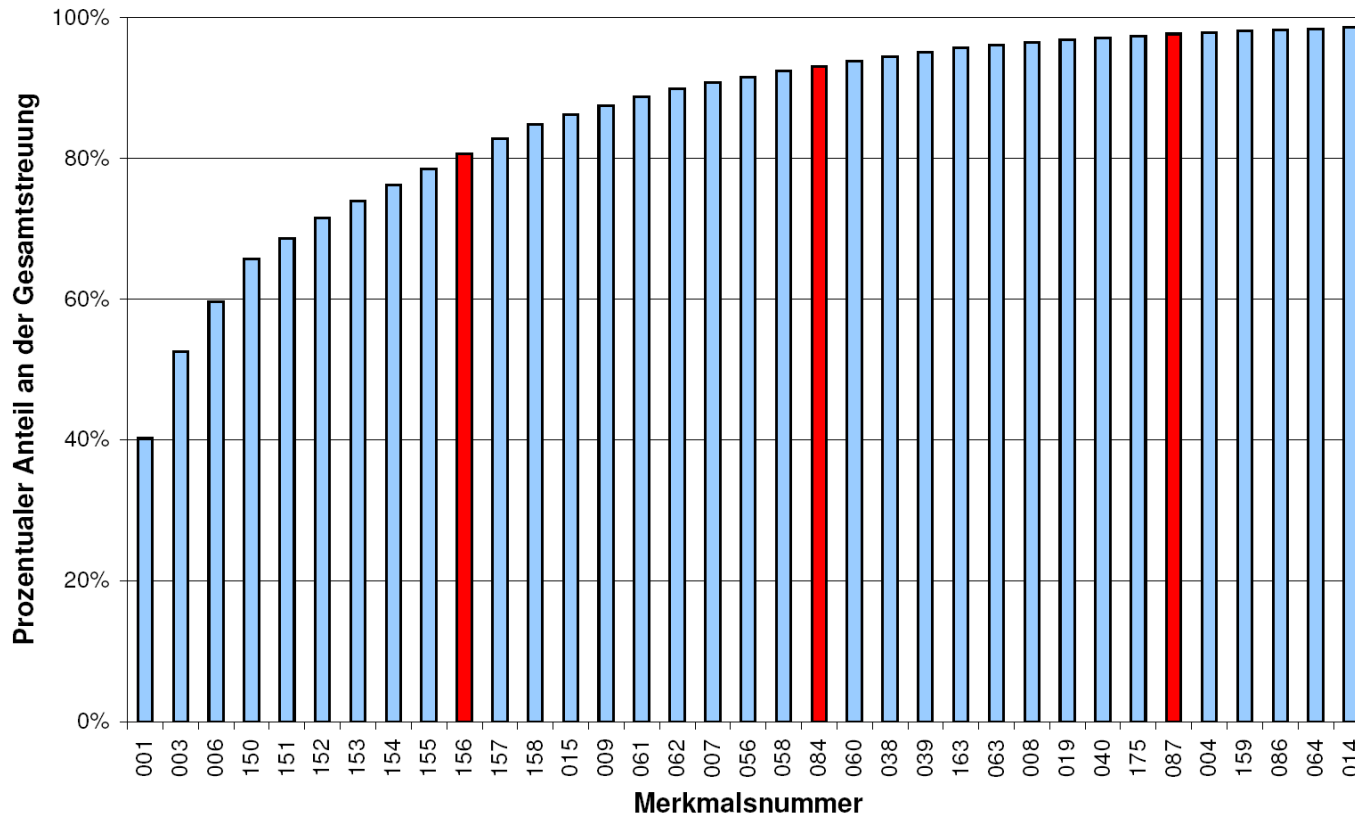


Abb.10: Prozentualer Anteil eines Merkmals an der Gesamtstreuung



# Agenda

**1. Einführung und Zielsetzung**

**2. Modellierung der Leistungsverschlechterung**

**3. Ergebnisse und Einsatzbereich**

**4. Zusammenfassung**



## Anwendungsmöglichkeiten für Hersteller, Betreiber und Instandhaltungsbetriebe

- **Mathematische Beschreibung des Triebwerkszustands über die Zeit**
- **Modellierung der Veränderung von Leistungsparametern über die Zeit**
- **Auswirkung neuer Technologien, Fertigungsverfahren auf Leistung**
- **Sensitivitätsanalyse: Identifikation der treibenden Einflussgrößen (u. a. Merkmale)**
- **Wirtschaftliche Bewertung neuer Technologien über den Lebenszyklus**

### Anmerkung:

- **Detaillierte Kenntnisse des zu modellierenden Triebwerks sind erforderlich**
- **Ergebnisse beruhen auf der Qualität der Zustandsmodellierung der Merkmale**



**Dipl.-Ing. Friederike Gräter**

Institut für Luftfahrtantriebe  
Universität Stuttgart

Pfaffenwaldring 6  
70569 Stuttgart  
Tel: +49 (0) 711-685-63522  
Email: [graeter@ila.uni-stuttgart.de](mailto:graeter@ila.uni-stuttgart.de)