



1. Dresdner-Probabilistik-Workshop

Anwendung von probabilistischen Methoden im Aftermarket (von Turboluftstrahltriebwerken)

Dipl.-Ing. Matthias Müller

Institut für Luftfahrtantriebe, Universität Stuttgart

Das Projekt wird innerhalb von MECHAMOD - Lufo IV vom BMWI gefördert (Förderkennzeichen 20T0605).

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

Dipl.-Ing. Winfried-Hagen Friedl
Dr.-Ing. Matthias Weißschuh
Rolls-Royce Deutschland Ltd & Co KG

Dresden, 10. Oktober 2008



Übersicht

1. Motivation und Zielsetzung
2. Beschreibung, Ursachen und Modellierung von Bauteilschädigung
3. Probabilistische Modellierung mit Zyklengewichtung
4. Zusammenfassung



In den vergangenen Jahren wurde das traditionelle Geschäftsmodell der Triebwerkshersteller durch neue Vertragsformen abgelöst.

- Traditionell:

Verkauf des Triebwerks

Kunde zahlt für jede Überholung

Gewinnerzielung über den Verkauf von Ersatzteilen

⇒ Der Kunde trägt das Risiko bezüglich der Instandhaltungskosten.

- Heute:

Verkauf des Triebwerks

Festgelegter Betrag je Flugstunde

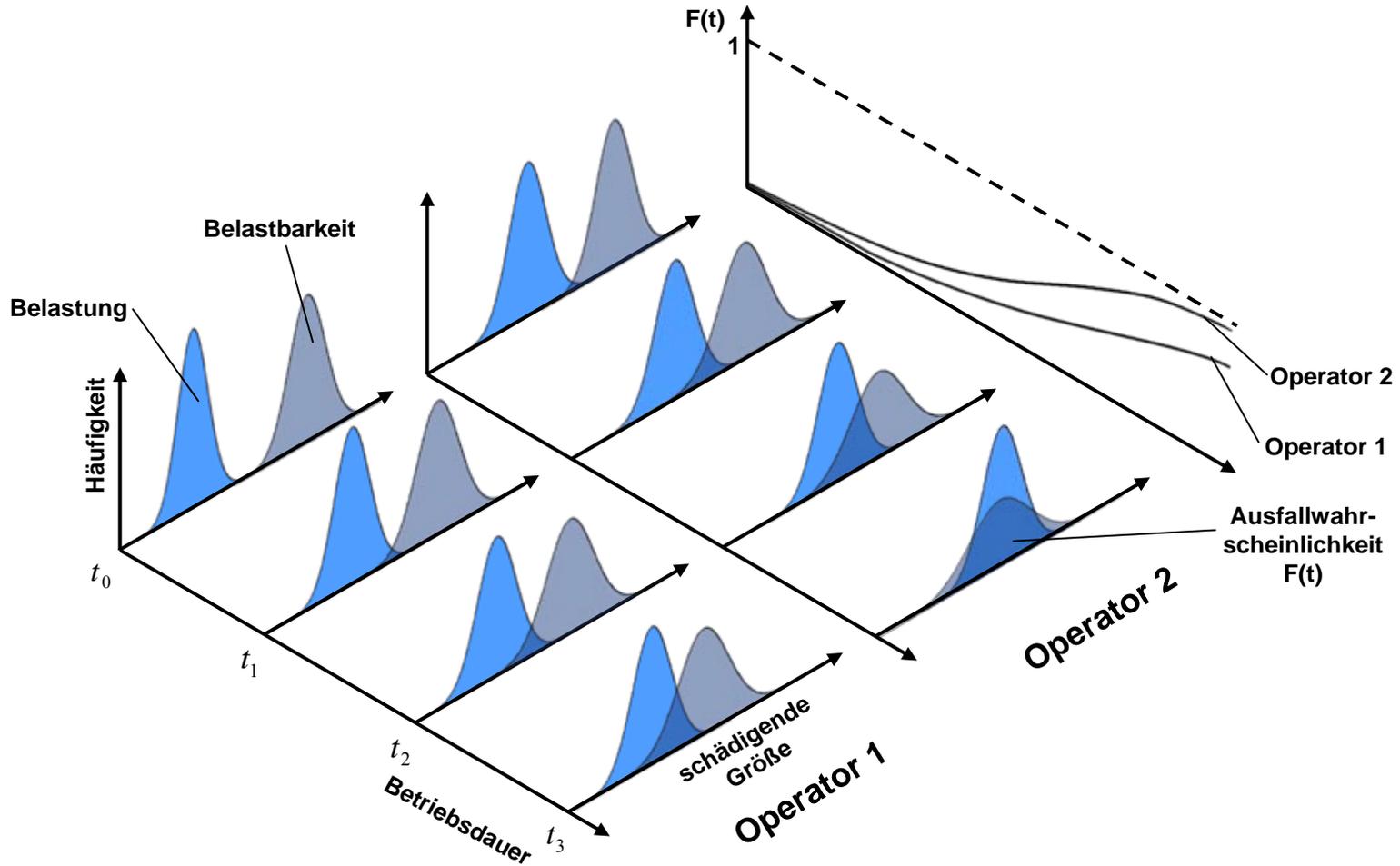
Gewinnerzielung wenn:
tatsächliche Kosten \leq
vorhergesagte Kosten

⇒ Der Triebwerkshersteller trägt das Risiko.

- Deutliche Unterschiede bei den Instandhaltungskosten zwischen den Betreibern
Ursache: unterschiedliche betreibertypische Umwelt- und Betriebsbedingungen
- Ziel der Modellierung:
Abschätzung der zu erwartenden Instandhaltungskosten einer Triebwerksflotte, in Abhängigkeit der charakteristischen Umwelt- und Betriebsbedingungen des Betreibers.



Die Streuungen der Bauteilbelastung und der Bauteilbelastbarkeit machen eine probabilistische Modellierung der Schädigung notwendig.





Die Streuung der Bauteilbelastung resultiert aus den betreibertypisch streuenden Umwelt- und Betriebsbedingungen.

Umweltbedingungen

- Umgebungstemperatur
- Umgebungsdruck
- Partikelkonzentration der Umgebungsluft
- Sulfatgehalt der Umgebungsluft

Betriebsbedingungen

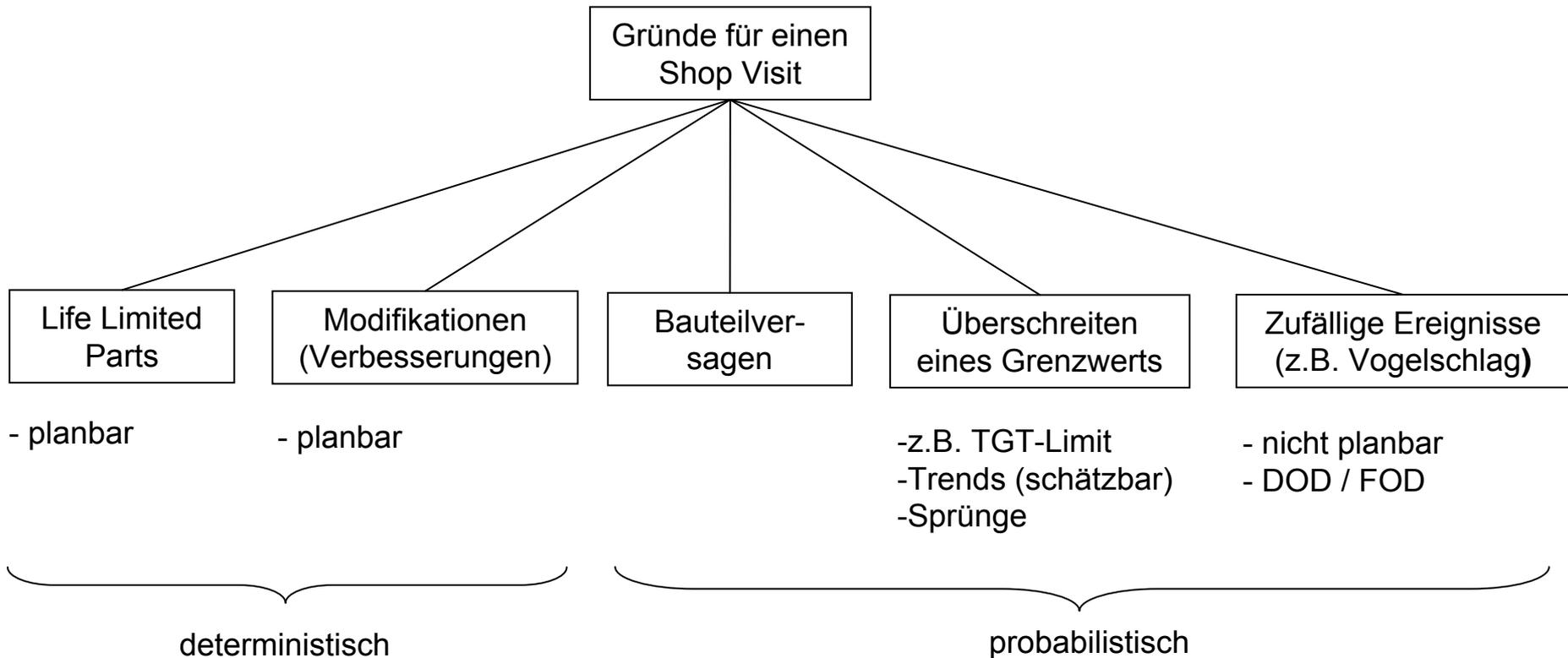
- Derate
- Flugdauer (Flugstunden je Zyklus)
- Flugmission (Rating, T/O-Schub)

⇒ Mithilfe der Triebwerksleistungsrechnung lassen sich die schädigungsrelevanten Größen (Temperaturen, Drehzahlen) angeben.

Darüber hinaus kommt es aufgrund der Triebwerksalterung zu einer Verschlechterung des Triebwerkswirkungsgrades, sodass die Bauteilbelastung über die Betriebsdauer (bis zu einer Triebwerksüberholung) zunimmt.



Zu den Gründen für eine Triebwerksüberholung gehören neben planbaren Ereignissen auch streuungsbehaftete Vorkommnisse.



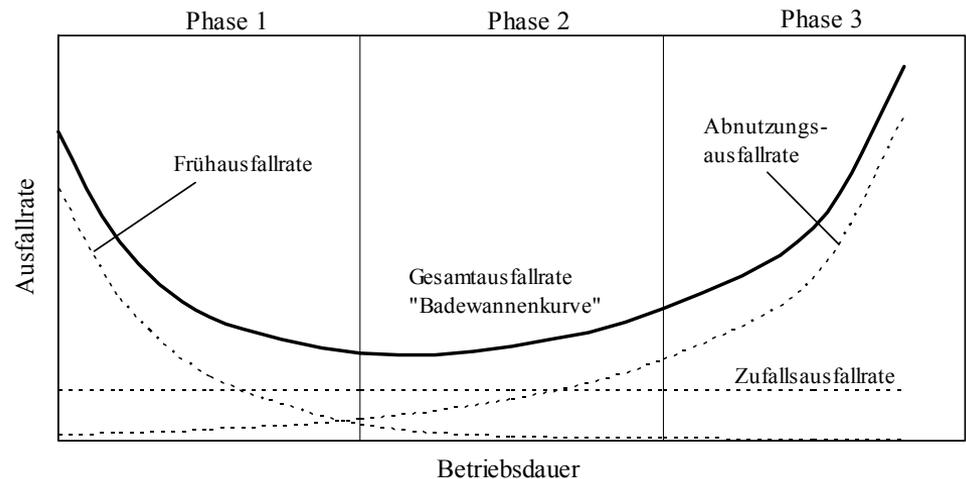


Bei den Bauteilen treten Früh-, Zufalls- und Verschleißausfälle auf.

- (1) **Frühausfälle:** Materialfehler, Montagefehler, Fertigungsfehler
⇒ selten bei „reifem“ Triebwerk
 - (2) **Zufallsausfälle:** z.B. Lager aufgrund zufällig auftretender Verschmutzungen
 - (3) **Abnutzungsausfälle:** Folge auftretender Schädigungsmechanismen
- } rein stochastische Modellierung
 }
 ← Ziel der Modellbildung

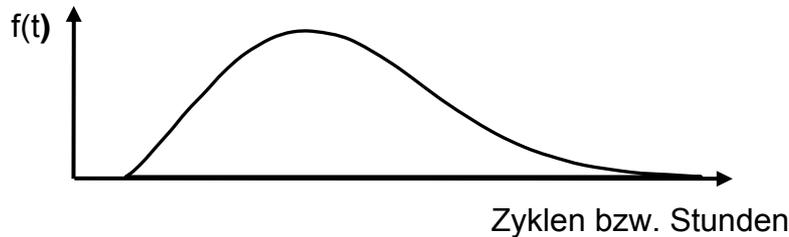
Schädigungsmechanismen:

- HCF
- LCF
- Thermomechanische Fatigue
- Fretting
- Kriechen
- Korrosion
- Erosion





Durch eine statistische Auswertung der Felddaten lässt sich jeweils eine Weibullverteilung für das Auftreten der verschiedenen Versagensursachen angeben.



$$f(t) = \frac{b}{T} \cdot \left(\frac{t-t_0}{T}\right)^{b-1} \cdot e^{-\left(\frac{t-t_0}{T}\right)^b}$$

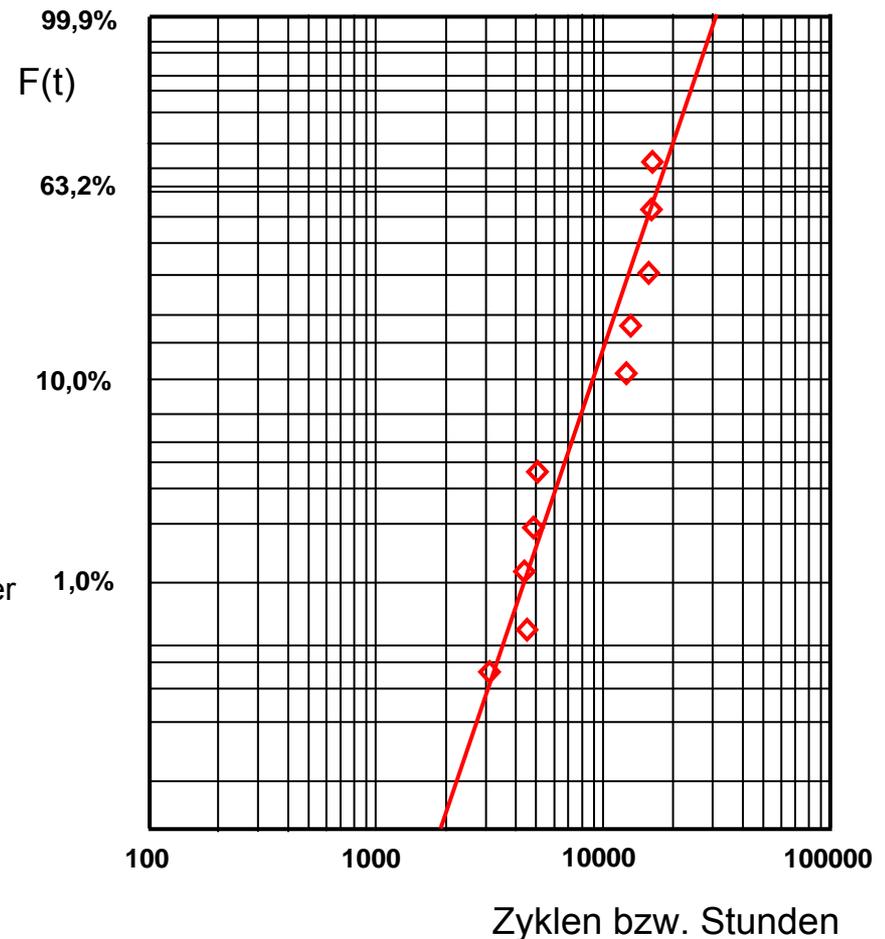
$$\int f(t)dt = F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-t_0}{T}\right)^b} [\%]$$

F(t): Ausfallwahrscheinlichkeit
f(t): Ausfalldichte

T: charakteristische Lebensdauer
b: Weibullsteigung
t₀: ausfallfreie Zeit

⇒ Diese Verteilungen enthalten sowohl die Belastungsstreuung, als auch die Belastbarkeitsstreuung.

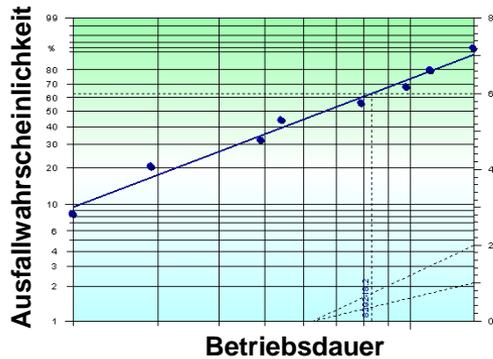
Weibullnetz





Die Modellierung der Bauteilschädigung erfolgt durch eine Felddatenanalyse in Kombination mit einer Analyse der physikalischen Zusammenhängen.

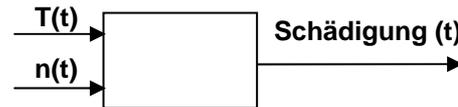
Verteilung der Ausfallwahrscheinlichkeit



Datenanalyse unter Berücksichtigung der Abhängigkeit von Zyklen bzw. Stunden.

Notwendige Angabe: Versagenszeitpunkt

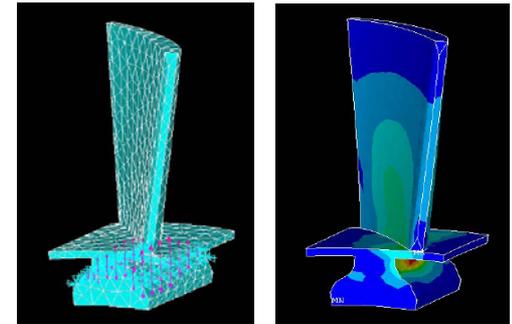
Datengetriebenes Modell unter Berücksichtigung der physikalischen Schädigungseinflüsse



Klassifikationsmethoden
Response Surface
Zyklengewichtung

Notwendige Angaben:
Grundlegendes Verständnis der Schädigungsvorgänge;
Historien dieser Einflussgrößen

Physikalisches Modell



z. B. Rissfortschrittsmodell, thermo-mechanisches Modell

Detaillierte Angaben über das Bauteil und dessen Belastung notwendig.

Zunahme des Aufwands und der benötigten Informationen



Die Gewichtung der Schädigungswirkung eines tatsächlichen Zyklus relativ zum Designzyklus erfolgt über eine Austauschrate ex.

- lebensdauer-dominierende Größe für Bauteil: Temperatur (z.B. TGT) bei T/O

$$ex = \frac{\Delta L}{\Delta T} \Big|_{\text{Designpunkt}}$$

$$\Delta L = L_{\text{tatsächlich}} - L_{\text{Design}}$$

$$\Delta T = T_{\text{tatsächlich}} - T_{\text{Design}}$$

L: Lebensdauer

T: Temperatur

N: Zyklenzahl

W: Gewichtungsfaktor

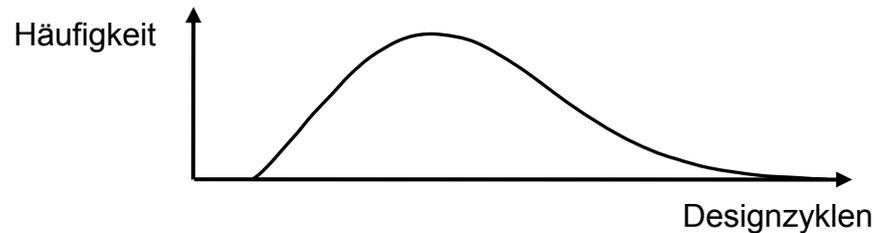
$$N_{\text{Referenzzyklen}} = \underbrace{\left(\frac{ex \cdot \Delta T}{L_{\text{Design}}} + 1 \right)}_W \cdot N_{\text{echte Zyklen}}$$

$$W = \frac{\text{Schädigung tatsächlicher Zyklus}}{\text{Schädigung Designzyklus}}$$

- Linearisierung des L-T- Zusammenhangs um den Designpunkt



Die Ausfallwahrscheinlichkeit einer Komponente wird in Abhängigkeit der Designzyklen angegeben. Damit wird ausschließlich die Streuung aufgrund der Bauteilbelastbarkeit berücksichtigt.



- Entsprechende Weibullverteilungen können unter Berücksichtigung der Gewichtungen aus den vorhandenen Felddaten abgeleitet werden.
- Gewichtung der Zyklen mit einer physikalischen Einflussgröße (z.B. T)
 \Rightarrow Berücksichtigung der Streuung der Betriebsbedingungen

$$T_{\text{tatsächlich}} > T_{\text{Design}} \Rightarrow N_{\text{Ref.}} > N_{\text{tatsächlich}}$$

\Rightarrow tendenziell früheres Versagen

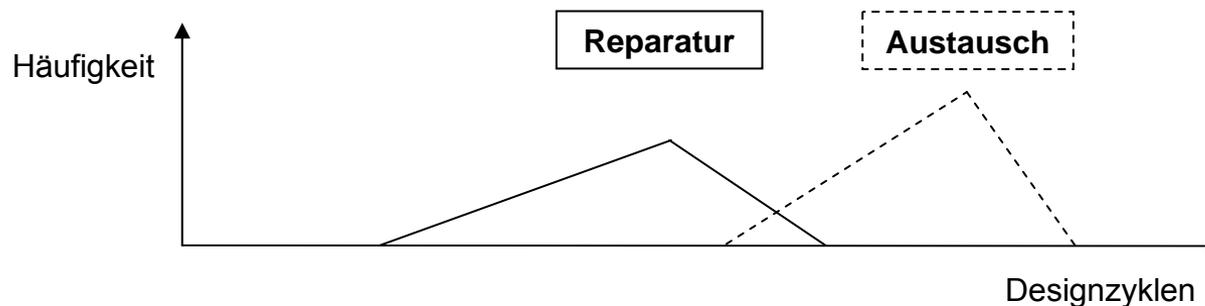
$$T_{\text{tatsächlich}} < T_{\text{Design}} \Rightarrow N_{\text{Ref.}} < N_{\text{tatsächlich}}$$

\Rightarrow tendenziell späteres Versagen



Die Modellierung der Wartungsbedürftigkeit der Komponenten erfolgt in analoger Weise.

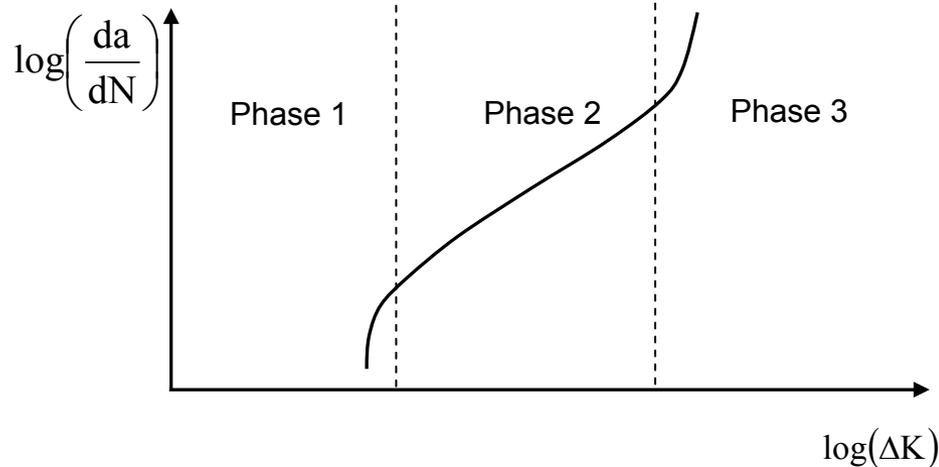
- Angabe frühester, wahrscheinlichster und spätester Zeitpunkt für Reparatur bzw. Austausch einer Komponente



- Angabe der Verteilungen für die verschiedenen Schädigungsmoden
 ⇒ Erhöhung der Detailgenauigkeit der Modellierung
 z.B. Reparatur bzw. Austausch infolge von Fretting, Rissen, usw.



Die vorgestellte Modellierungsmethode berücksichtigt die 3 verschiedenen Phasen der Risschädigung.



Phase 1: Rissentstehung

Phase 2: Stabiles Risswachstum

Phase 3: Instabiles Risswachstum (Versagen)

Spannungsintensitätsfaktor K:

$$\Delta K = Y \sqrt{\pi \cdot a} \cdot (\sigma_{\max} - \sigma_{\min})$$

Rissfortschrittsgeschwindigkeit (Paris-Gleichung):

$$\frac{da}{dN} = C \cdot \Delta K^m$$

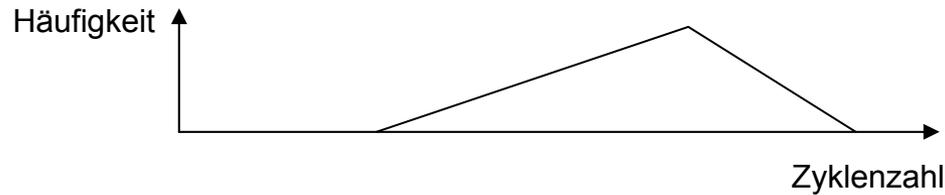
Beschreibung des stabilen Risswachstums durch eine Gleichung der Form:

$$a = c_1 \cdot N^{c_2}$$

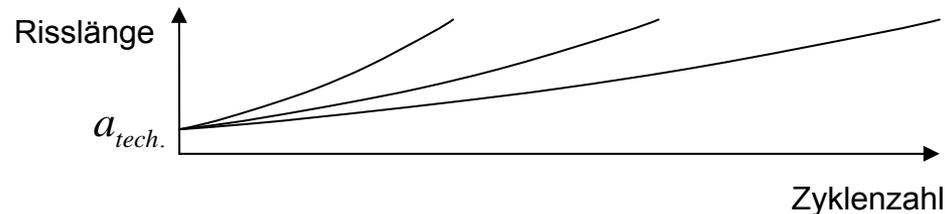


Probabilistische Modellierung der Risschädigung

- **Rissentstehung:** frühester, häufigster und spätester Zeitpunkt des Auftretens eines technischen Anrisses



- **Rissfortschritt:** Zunahme der Risslänge im schlechtesten, wahrscheinlichsten und besten Fall



- **Versagensrisslänge:** Verteilung der kritischen Risslänge



⇒ Möglichkeit die Inspektionen im Modell zu berücksichtigen



Kriechen ist für Turbinenlaufschaufeln einer der wesentlichen Schädigungsmechanismen.

- **zahlreiche Einflussgrößen:** Geometrie, mehrdimensionaler Spannungszustand, Materialveränderung, tatsächliche Temperaturverteilung
- **Reduktion auf dominierende Größen:**

$$t_f = f(\text{Temperatur, Spannung})$$

$$\varepsilon = \frac{T_{\text{Gas}} - T_{\text{Metall}}}{T_{\text{Gas}} - T_{\text{Kühl}}}$$

$$\sigma = \left(\frac{N}{N_{\text{Design}}} \right)^2 \sigma_{\text{Design}}$$

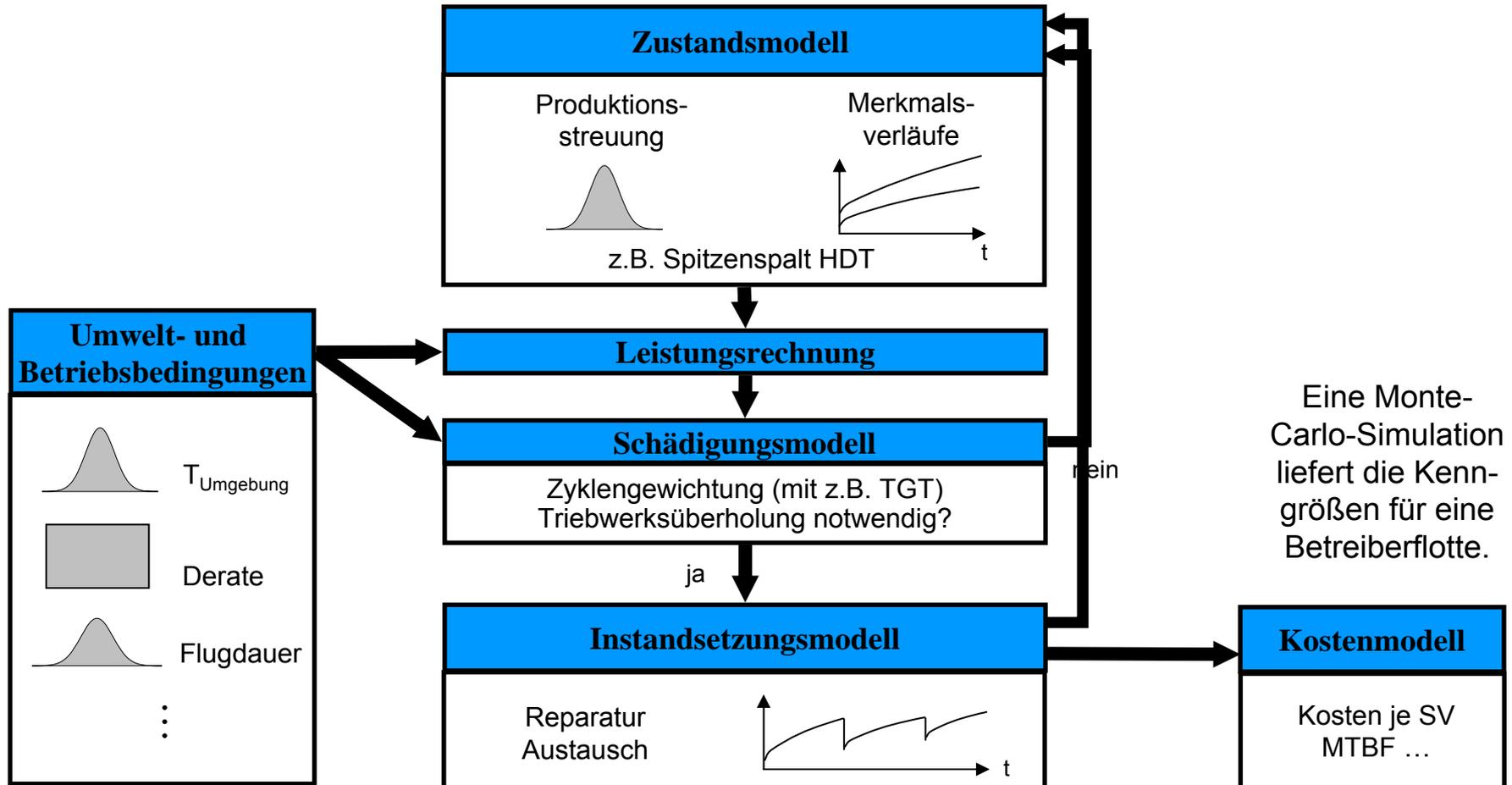
t_f : Kriechlebensdauer in Stunden
 ε : Kühleffektivität

Gaslasten und thermische Spannungen vernachlässigt

- **Larson-Miller-Gleichung:**

$$\log t_f = \frac{10^3 P}{T} - C \quad \text{mit } P = f(\sigma) \quad C \approx 20$$

Der Berechnungsablauf des Modells berücksichtigt die Auswirkungen des Betriebs und der Überholungen auf den Triebwerkszustand und damit auch die variierende Schädigungswirkung der Zyklen.





Zusammenfassung

- **Aufbau eines probabilistischen Modells zur Vorhersage der Wartungszeitpunkte und Kosten unter Berücksichtigung der betriebsartypisch streuenden Umwelt- und Betriebsbedingungen.**
- **Getrennte Modellierung der unterschiedlichen Streuungseinflüsse:**
 - **Belastungsstreuung: Zyklengewichtung mithilfe von Triebwerksleistungsgrößen (Temperaturen, Drehzahlen)**
 - **Belastbarkeitsstreuung: Ausfallverteilungen in Abhängigkeit der Designzyklenzahl**



Kontakt



Dipl.-Ing. Matthias Müller

Institut für Luftfahrtantriebe
Universität Stuttgart

Tel.: +49 (0) 711 / 685 - 63548

Fax: +49 (0) 711 / 685 - 63505

Email: mueller@ila.uni-stuttgart.de