

DGZfP – Seminar des Fachausschusses Ultraschallprüfung  
Offenbach, 09. – 10. November 2011



## **Betriebssicherheit von metallischen Flugzeugstrukturen durch schadenstolerante Auslegung und periodische Inspektionen**

**Hans-Jürgen Schmidt und Bianka Schmidt-Brandecker**  
AeroStruc – Aeronautical Engineering

DGZfP FA Ultraschall Nov. 2011, Präsentation Schmidt

### Inhalt



- **Auslegungskonzepte für Metall-Struktur**
- **Auslegungslasten und -kriterien für die Struktur**
- **Lebensdauer-, Rissfortschritts- und Restfestigkeits-Analyse**
- **Inspektionskonzepte und entdeckbare Risslängen**
- **Problem von multiplen Rissen**
- **Schlussfolgerungen**

DGZfP FA Ultraschall Nov. 2011, Präsentation Schmidt

Oktober 2011 Page 2



# Auslegungskonzepte für Metall-Struktur

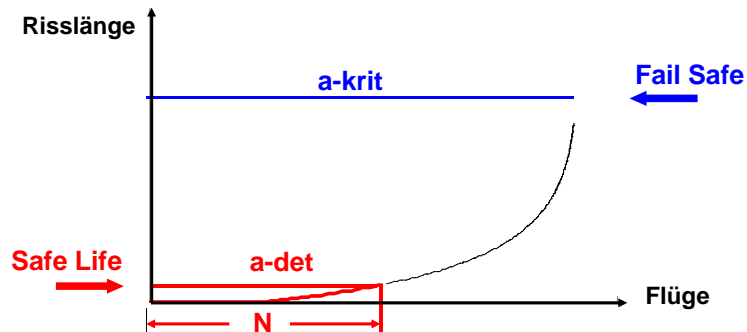
## Safe Life: (von 1956 bis 1978) \*

- **Ziel:** Anrisslebensdauer  $N$
- **Methode:** Palmgren/Miner
- **Reine Materialermüdung**
- **Schäden aus Fertig. + Betrieb, Korrosion unberücksichtigt**

## Fail Safe: (von 1956 bis 1978)

- **Ziel:** kritische Rißlänge  $a$ -krit
- **Methode:** bruchmechan. Analyse
- **Redundanz soll Rissfindung rechtzeitig sicherstellen**
- **keine gezielte Inspektionsforderung**

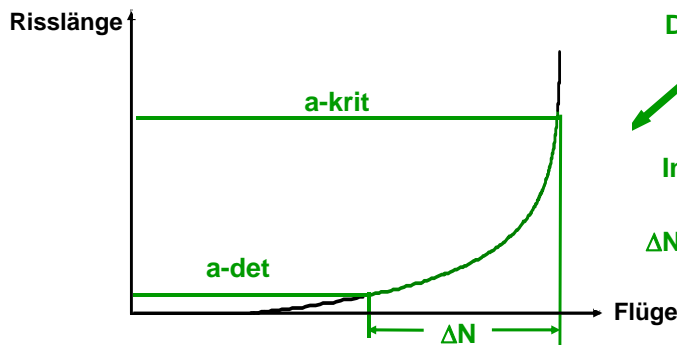
\* aktuell nur für Fahrwerke erlaubt



# Auslegungskonzepte für Metall-Struktur

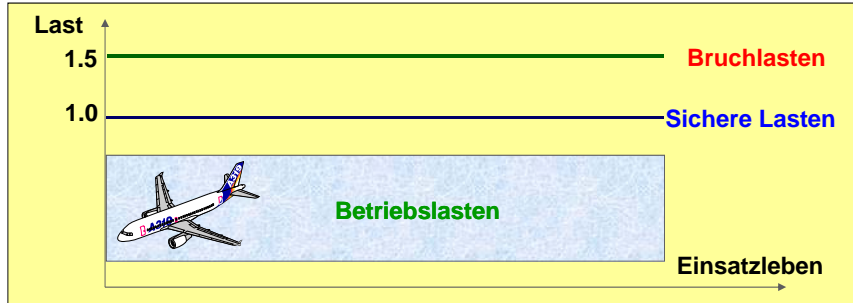
## Damage Tolerance: (aktuell ab 1978)

- **Ziel:** Rissfortschritt  $\Delta N$  + kritische Rißlänge  $a$ -krit
- **Methode:** bruchmechanische Analyse
- **Sicherheit durch gezielte Inspektionen**
- **Redundanz wünschenswert, aber nicht gefordert**



Damage Tolerance  
 $\downarrow$   
 Inspektionsintervall  
 =  
 $\Delta N / \text{Sicherheitsfaktor}$

# Auslegungslasten für die Struktur



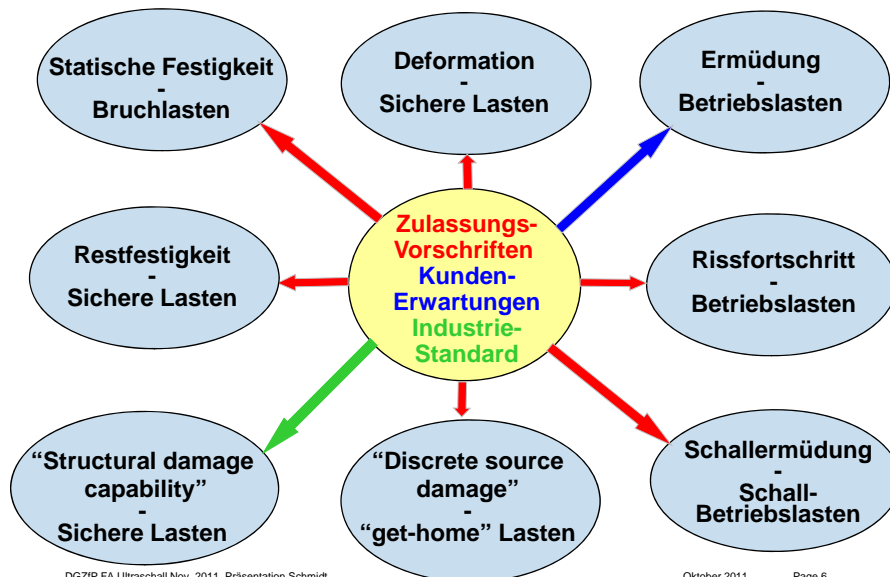
**Sichere Lasten:** - Maximale Struktur-Lasten, treten max. einmal pro Leben auf  
- keine wesentliche permanente Deformation zulässig



Die Basis zur Berechnung der Lasten ist in den Vorschriften definiert.

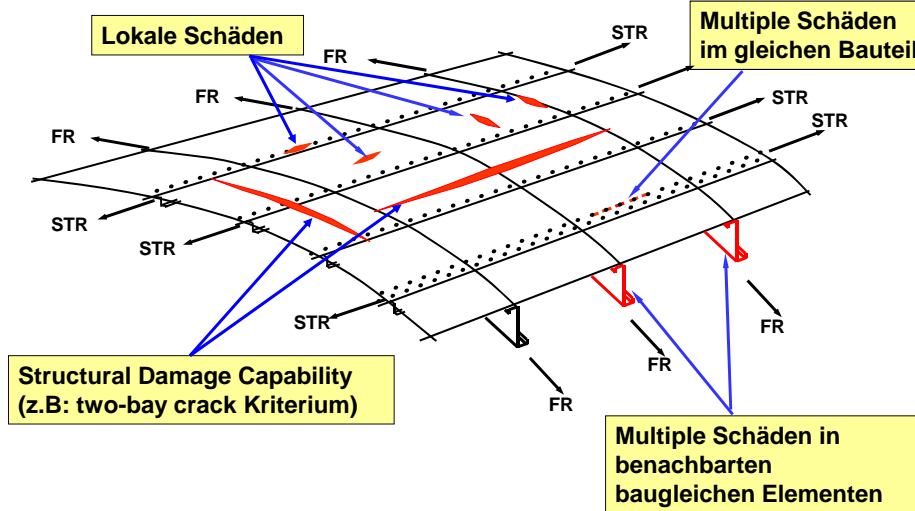
# Auslegungskriterien für die Struktur

## Auslegungskriterien für Originalstruktur, Modifikationen und Reparaturen



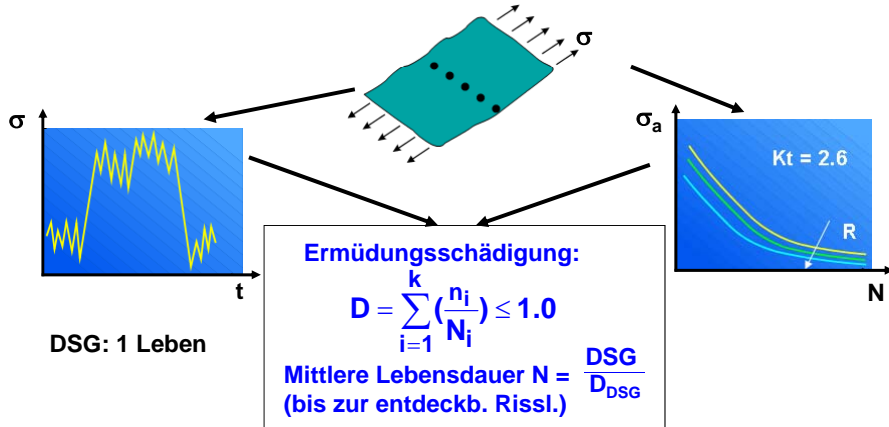
# Fatigue und Damage Tolerance Konzept

Beispiel: Schale im Druckumpf  
Theoretische Schäden für F&DT Analyse



# Lebensdauer-Analyse – Metallstruktur

- Bearbeitung des Belastungsspektrums ⇒ Rainflow Methode
- Schadensakkumulation ⇒ Palmgren-Miner Regel



**Sichere Lebensdauer N =  $\frac{\text{Mittlere Lebensdauer}}{\text{Sicherheitsfaktor}}$**

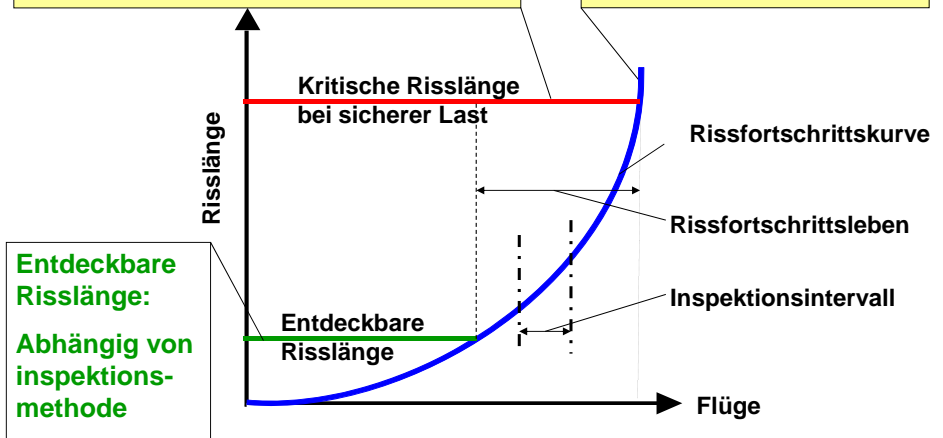
# Rissfortschritts- und Restfestigkeits-Analyse – Metallstruktur

**Kritische Risslänge bei sicherer Last:**

$$a_c = \left( \frac{K_c}{\sigma_{LL} \cdot \alpha_{1,n}} \right)^2 \cdot \frac{1}{\pi}$$

**Rissfortschritt:**

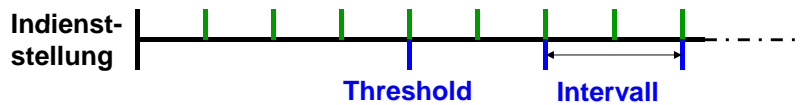
$$da/dn = \frac{C \cdot \Delta K^n}{(1-R) \cdot K_c - \Delta K}$$



# Inspeptionskonzepte

**Allgemeine Zustandskontrollen**

- Allgemeine Sichtinspektionen (Struktur und Systeme) (äußere Beschädigungen, Korrosion, Risse)



**Gezielte Strukturinspektionen**

- Detaillierte Sichtinspektionen (Korrosion, Risse)
- zerstörungsfreie Prüfungen sichtbarer und verdeckter Bereiche (Risse, Korrosion)

**Definition des Struktur-Inspektionsprogramms:**

- Inspektionsbereich
- Erstinspektion (Threshold)
- Inspektionsintervall
- Inspektionsmethode

# Inspeptionskonzepte



## Ermittlung der Inspeptionsforderungen

- **Äußere Beschädigungen:** im Wesentlichen aus Erfahrungswerten (kann Ermüdung + Korrosion beeinflussen)
- **Korrosion:** Rating-Tabellen – berücksichtigen Material, Oberflächenschutz, Örtlichkeit
- **Ermüdungsrisse:**
  - Erstinspektion: Lebensdauer oder Rissfortschritt
  - Intervall: Rissfortschritt und Restfestigkeit

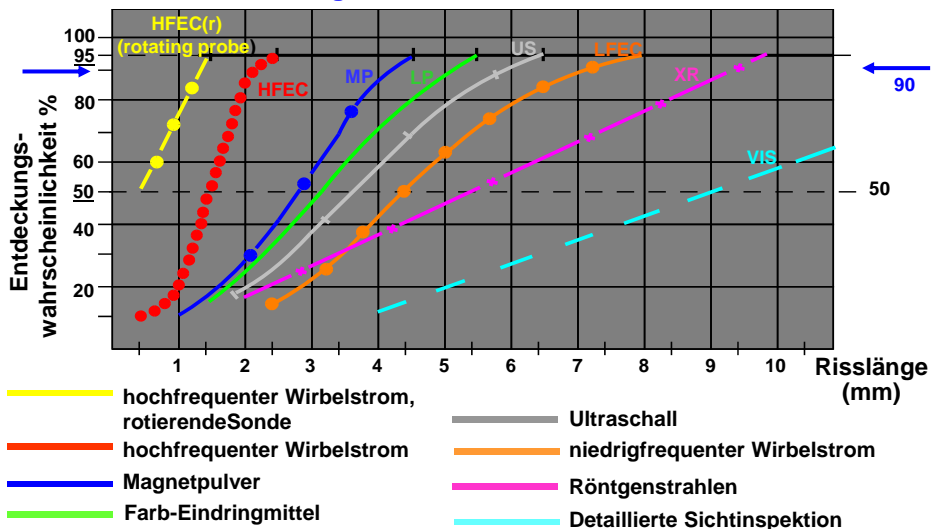
## Beispiel (Airbus A330/A340 bei Zulassung)

Inspektion	A330	A340
Allgemeine Sichtinspektion	18 Mon. (≈ 3000 F)	18 Mon. (≈ 1100 F)
Detaillierte Sichtinsp. + ZfP		
• Erstinspektion	15 000 F	8 750 F
• Intervall	8 000 F	4 500 F

# Entdeckbare Risslängen für ZfP – Beispiele



Forderung: Entdeckungswahrscheinlichkeit: 90 Prozent  
 Vertrauensgrad: 95 Prozent



## Problem von multiplen Rissen – Beispiel Längsnähte

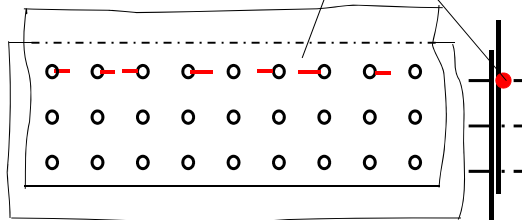


**Southwest 2011**

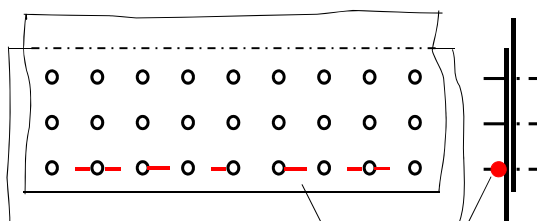


DGZIP FA Ultraschall Nov. 2011, Präsentation Schmidt

### Risse im Außenblech



### Risse im Innenblech



Oktober 2011 Page 13

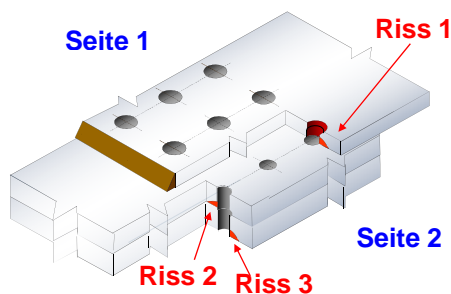
## Problem von multiplen Rissen – Möglichkeiten der ZfP bei Längsnähten

Ergebnisse von Vergleichsversuchen internationaler ZfP-Institute  
und Firmen 1998 :

### Fähigkeiten der ZfP

(Entdeckbarkeit unter

kontrollierten Bedingungen mit  
optimaler Methode)



Details:

Al Legierung 2024T3

3 Lagen je 1.3 mm

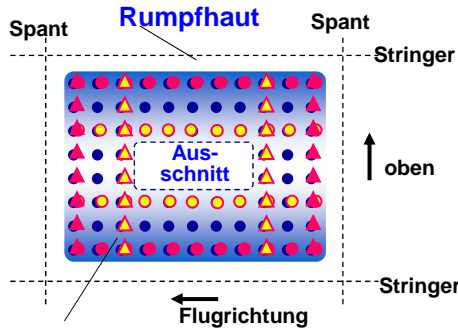
Al NAS 1097-AD5 Senkniete

1998	Entdeckbare Risslänge (mm)
<b>Sensor auf Seite 1</b>	
Riss 1	1,3
Riss 2	6,4
Riss 3	7,9
<b>Sensor auf Seite 2</b>	
Riss 1	8,0
Riss 2	6,4
Riss 3	2,5

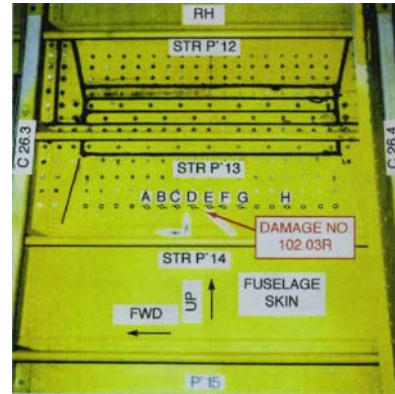
DGZIP FA Ultraschall Nov. 2011, Präsentation Schmidt

Oktober 2011 Page 14

# Problem von multiplen Rissen – Beispiel Rumpf-Hautreparaturen



Risse in der Haut am Auslauf eines Reparaturdopplers in einem Großzellen-Ermüdungsversuch



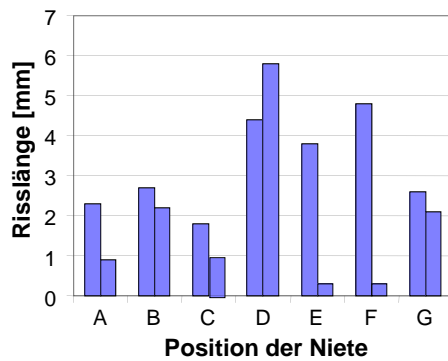
Reparatur-doppler

**Ermüdungskritische Stellen:**

- In der Haut ▲ ●
- Im Doppler ▲ ●

# Problem von multiplen Rissen – Beispiel Rumpf-Hautreparaturen

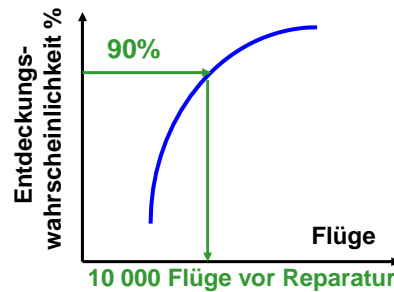
Risszenario in der Haut am Auslauf des Reparaturdopplers  
10 000 Flüge vor Reparatur



Entdeckungswahrscheinlichkeit des Gesamtproblems

$$P_{ges} = 1 - \prod (1 - P_i)$$

P<sub>i</sub> : Entdeckungswahrscheinlichkeit des Einzelrisses i



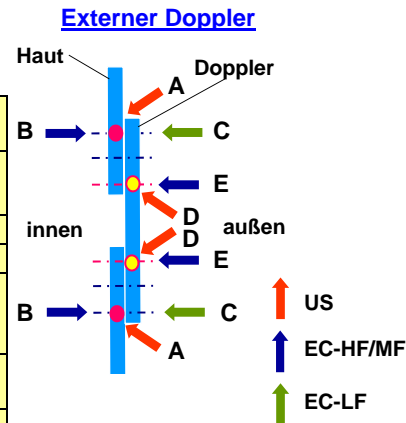
**Ziel:** Entdeckung des Gesamtszenarios mit  $P_{ges} \geq 90\%$ .  
Das Gesamtszenario wird entdeckt, bevor der längste Riss die entdeckbare Risslänge (90%/95%) erreicht.



## Problem von multiplen Rissen – Inspektionsforderungen für Hautreparaturen

**Beispiel: Hautreparatur, Intervalle sind abhängig von der Position und der Geometrie der Reparatur**

Item	Inspektion	Inspektionsintervall-Längskanten (Flüge)		
		Alternative Inspektionsmethoden		
		US	EC-HF/MF	EC-LF
Haut	I	5 000	6 000	5 000
	Inspektion	von außen	von innen (wenn Zugang)	von außen
	Prüfkopf-Position	A	B	C
Dopp-ler	I	9 900	11 900	-
	Inspektion	von außen	von außen	-
	Prüfkopf-Position	D	E	-



### Bemerkungen:

- A, B und C sind alternative Methoden, B benötigt Zugang von innen
- D und E sind alternative Methoden

## Schlussfolgerungen

- Safe Life und Fail Safe Konzepte erwiesen sich als nicht ausreichend die Lufttüchtigkeit der Flugzeuge zu erhalten wegen fehlender detaillierter Inspektionsforderungen.
  - Das 1978 eingeführte Damage Tolerance Konzept ist am besten geeignet, die Lufttüchtigkeit der Struktur sicherzustellen.
  - Das Damage Tolerance Konzept erfordert ein adäquates Struktur-Inspektionsprogramm, beruhend auf Analysen und Versuchen, mit detaillierten Sichtinspektionen und zerstörungsfreien Prüfungen.
  - Etliche Strukturbauteile werden mit zerstörungsfreien Prüfungen inspiziert wegen fehlender visueller Zugänglichkeit und/oder um akzeptable Intervalle zu erreichen.
- Ziele der Weiter- bzw. Neuentwicklung von ZfP:
    - sichere Entdeckung von notwendigen und von der Industrie vorgegebenen Risslängen
    - Reduzierung der Falschalarmrate
    - Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit