

# ***Festigkeitsrelevante und bruchmechanische Charakterisierung zyklisch belasteter SLM-Bauteile***

***Dipl.-Ing. Andre Riemer***

***13.09.2012***

**1. Motivation**

**2. Verhalten von SLM-Materialien bei zyklischer Belastung**

**3. Einflussfaktoren auf die Ermüdung**

**4. Optimierung des Ermüdungsverhaltens**

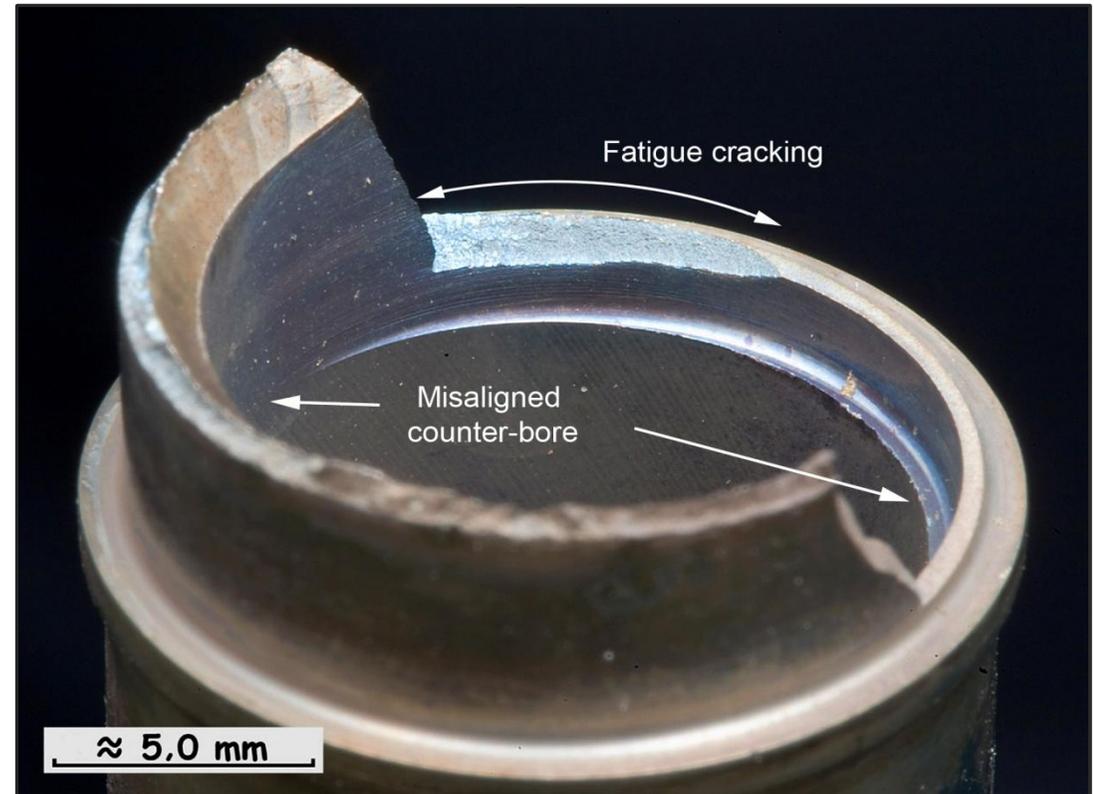
**5. Ausblick**



Zyklisch belastete Bauteile wie z. B. Flugzeugkomponenten ermüden

Rissinitiierung (begünstigt durch Materialdefekte) ist die Folge

Charakterisierung der Werkstoffe bzgl. der Schwingfestigkeit und des bruchmechanischen Verhaltens notwendig



Quelle: Untersuchungsbericht ATSB

# 1. Motivation

# 2. Verhalten von SLM-Materialien bei zyklischer Belastung

# 3. Einflussfaktoren auf die Ermüdung

# 4. Optimierung des Ermüdungsverhaltens

# 5. Ausblick

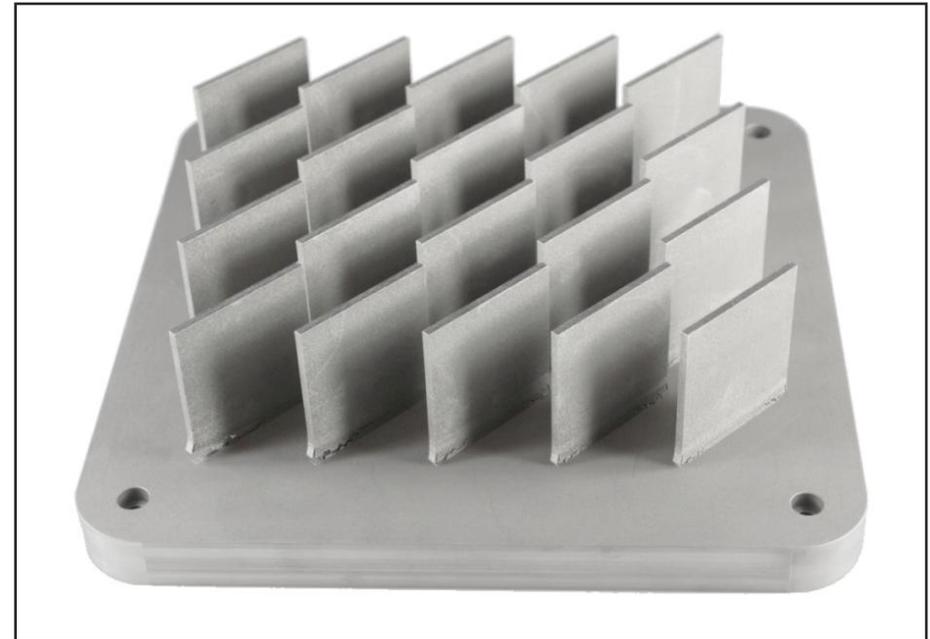


Werkstoff: TiAl6V4 / Probenherstellung: SLM 250 HL (SLM Solutions GmbH)

Schwingproben

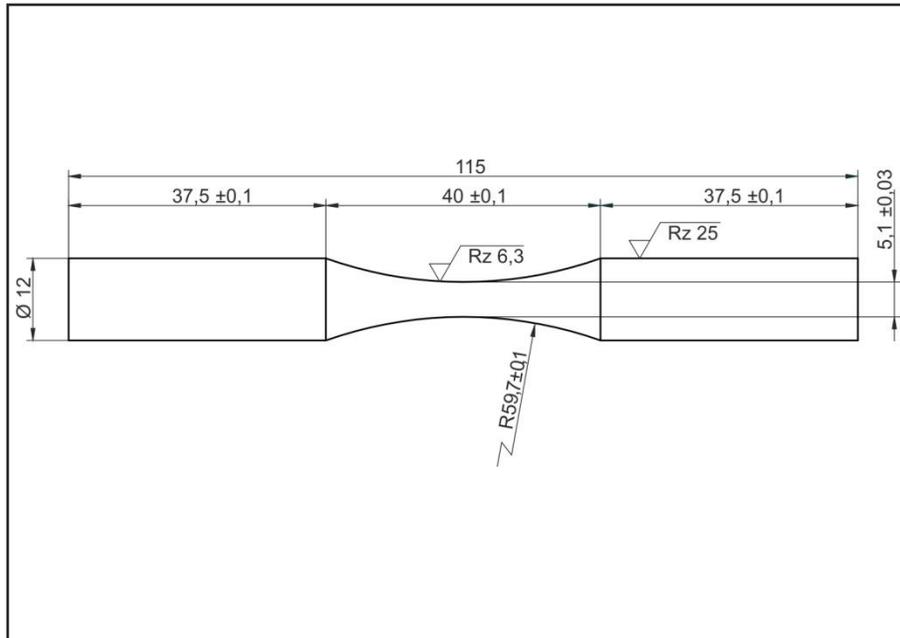


Kompaktzugproben

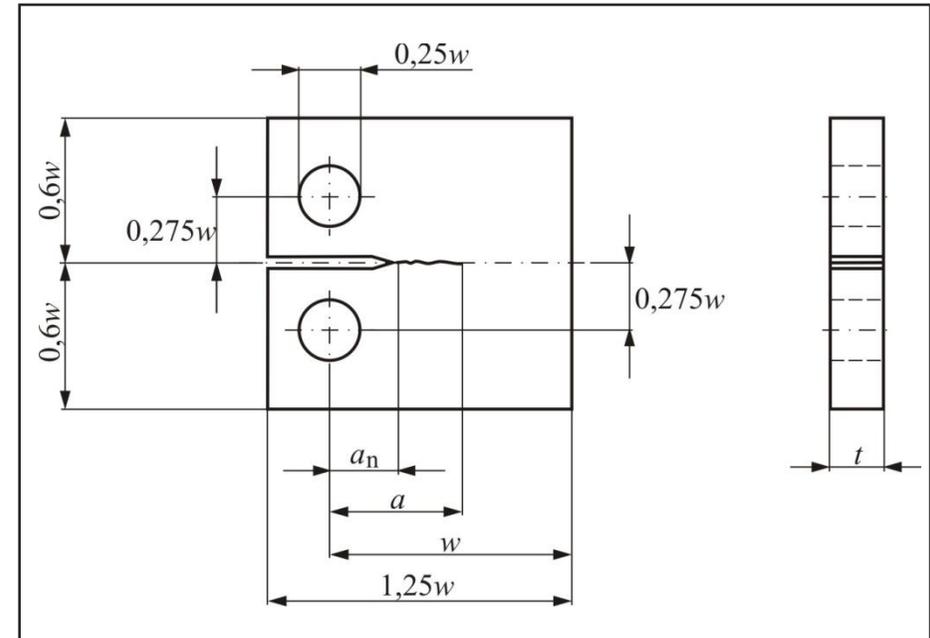


Werkstoff: TiAl6V4 / Probenherstellung: SLM 250 HL (SLM Solutions GmbH)

Schwingproben nach ASTM E466-07

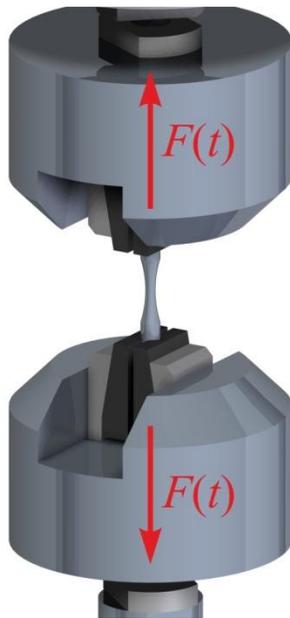


Kompaktzugproben nach ASTM E 647-08



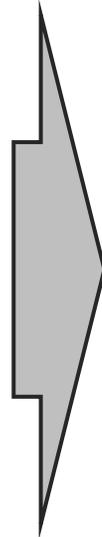
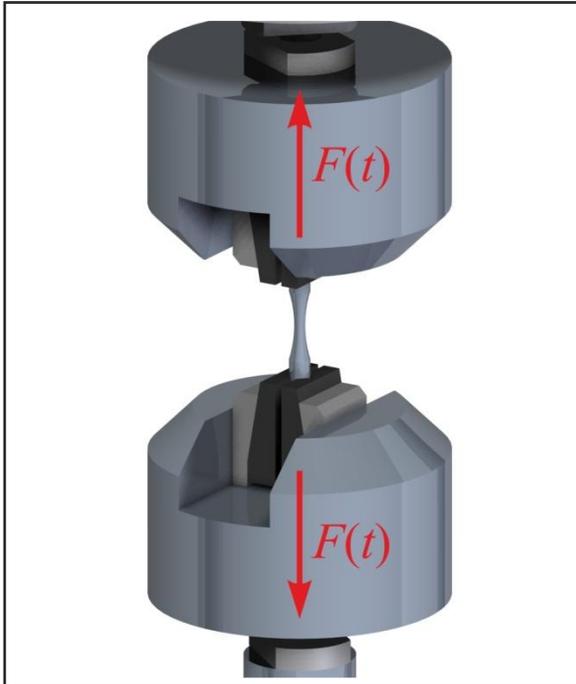
## Schwingfestigkeitsuntersuchungen

Schwingproben nach ASTM E466 – 07

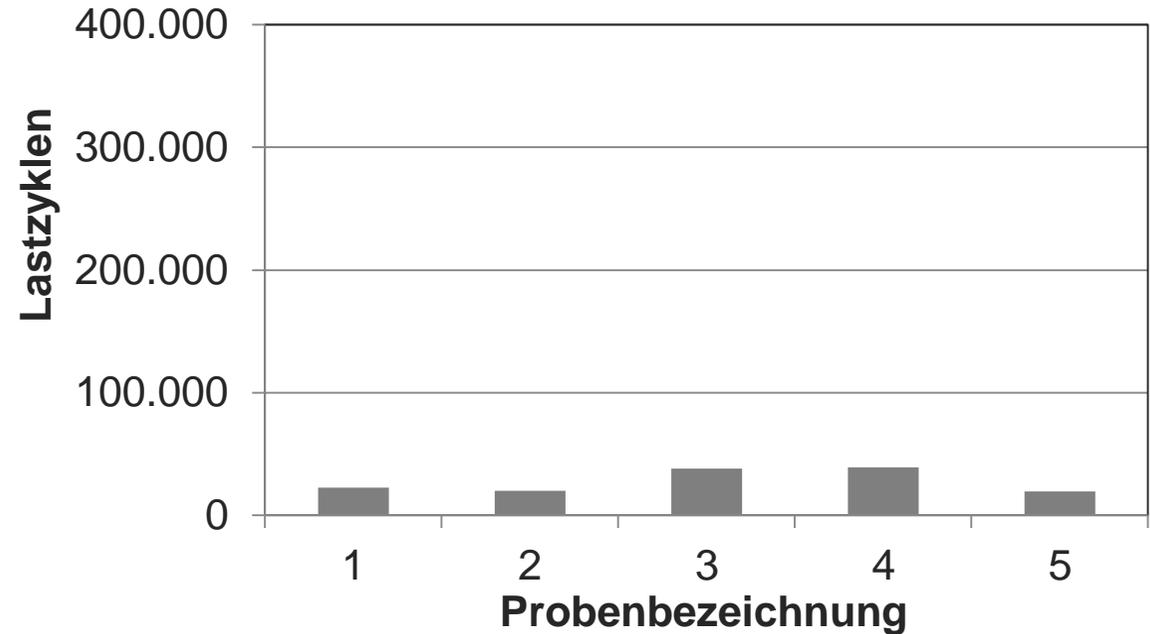


- Ermüdung mit einer Lastamplitude von 600MPa
- R-Verhältnis: -1
- Kraftsignal: sinusförmig
- Raumtemperatur: 20°C

## Schwingfestigkeitsuntersuchungen



Ti-64, as built, 600 MPa, z-direction



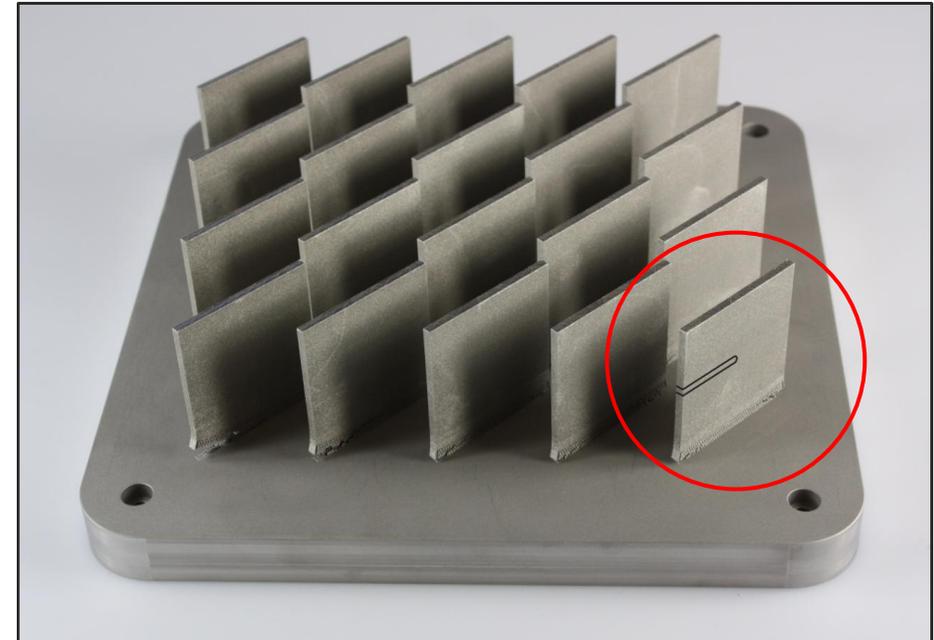
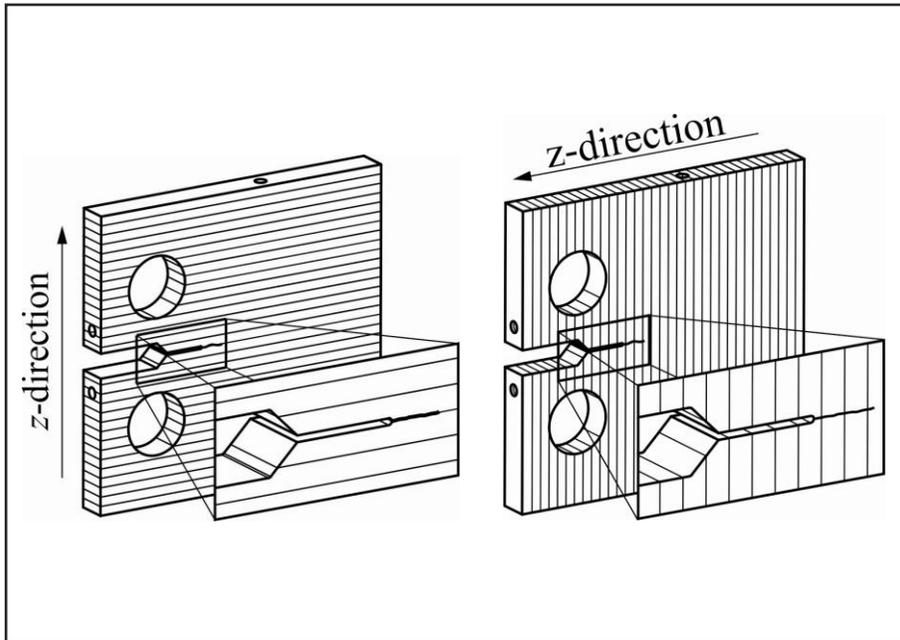
Versuche am Grundmaterial bei  $2 \cdot 10^6$  Lastwechsel abgebrochen



Optimierung notwendig

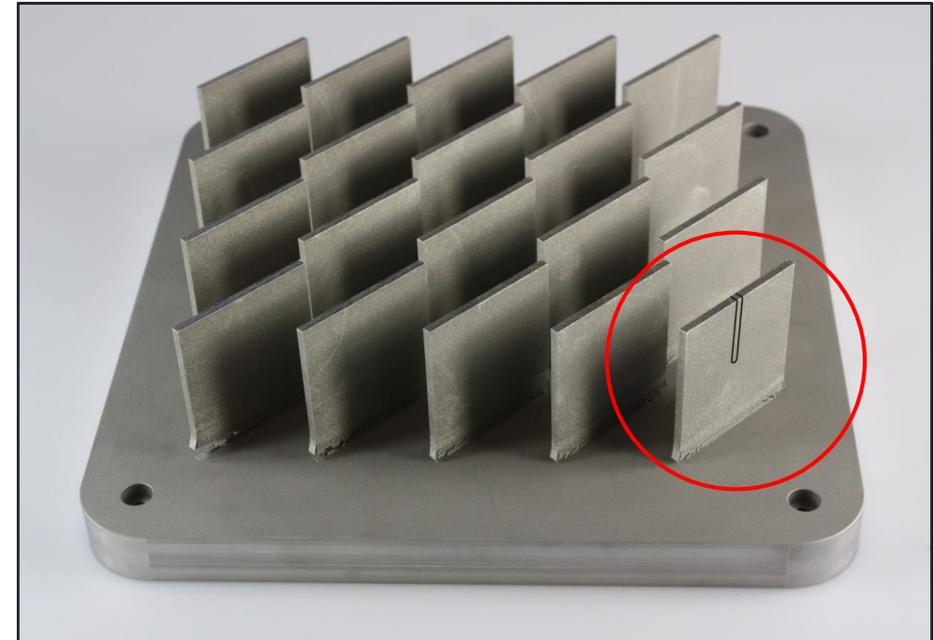
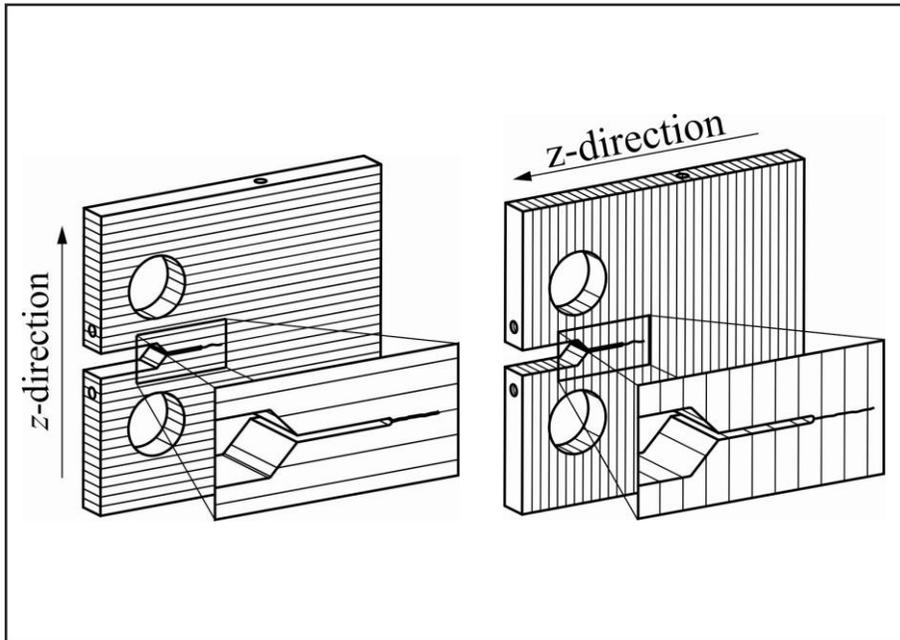
Werkstoff: TiAl6V4 / Probenherstellung: SLM 250 HL (SLM Solutions GmbH)

Kompaktzugproben nach ASTM E 647-08



Werkstoff: TiAl6V4 / Probenherstellung: SLM 250 HL (SLM Solutions GmbH)

Kompaktzugproben nach ASTM E 647-08

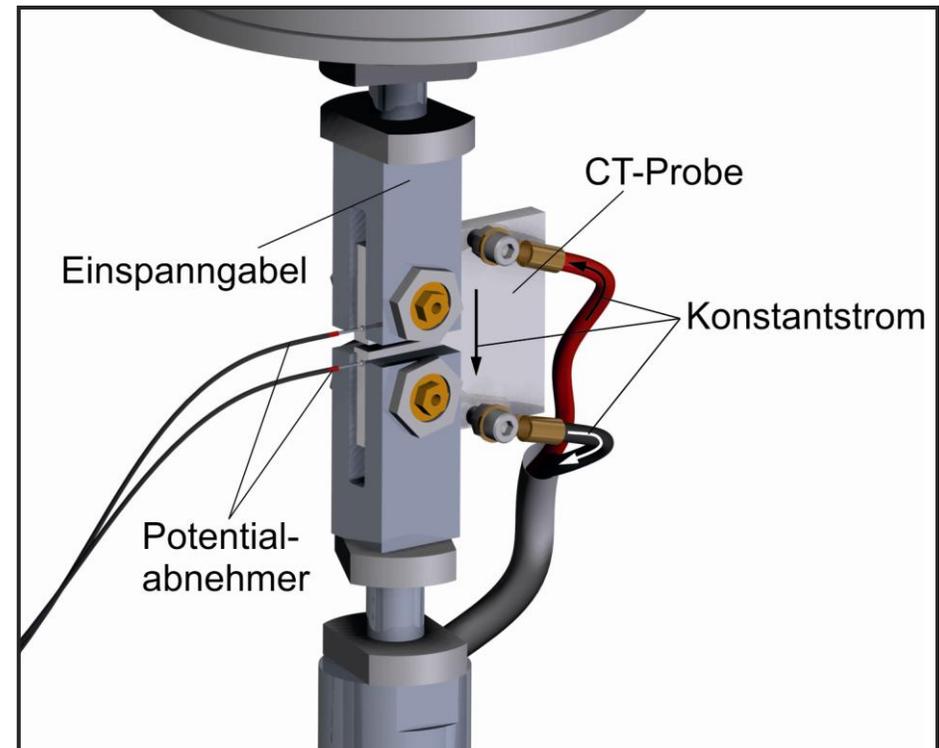


## Bruchmechanische Untersuchungen

### Messmethode:

#### Elektropotentialverfahren

- Einspeisung des konstanten Stroms in die Probe
- Messung des Spannungsabfalls
- Rissverlängerung durch  $F(t)$ 
  - => Restquerschnitt  $(w-a) \cdot t \downarrow$
  - => elektrischer Widerstand  $\uparrow$
  - => Potentialdifferenz  $\uparrow$  ( $U = R \cdot I$ )
- Risslängenbestimmung über eine zuvor (in Kalibrierversuchen) aufgenommene Funktion  $a(U)$

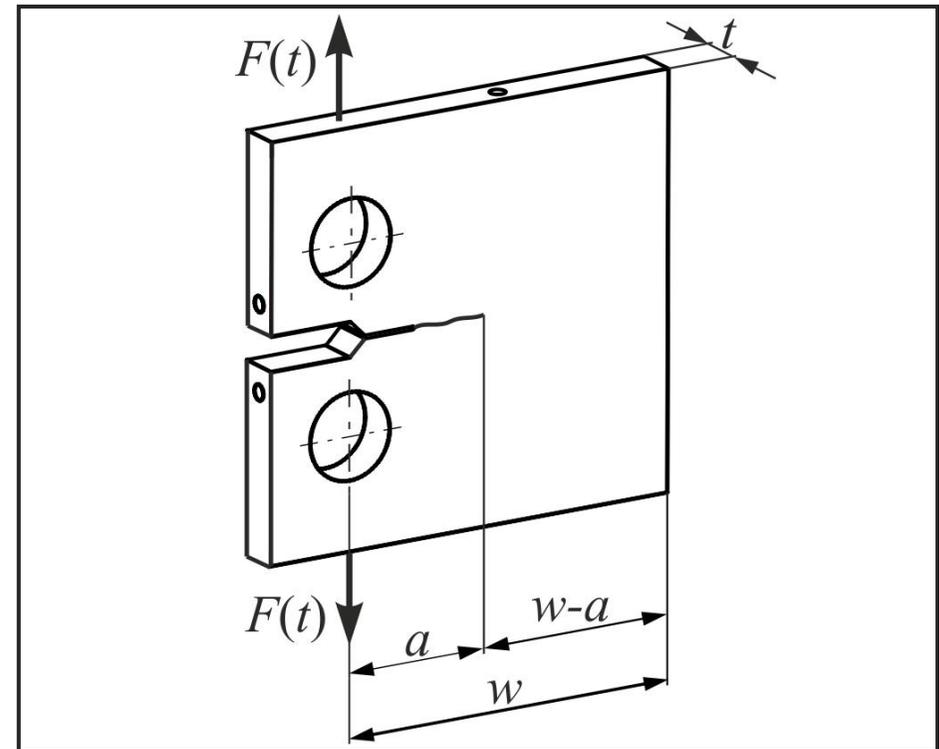


## Bruchmechanische Untersuchungen

### Messmethode:

#### Elektropotentialverfahren

- Einspeisung des konstanten Stroms in die Probe
- Messung des Spannungsabfalls
- Rissverlängerung durch  $F(t)$ 
  - => Restquerschnitt  $(w-a) \cdot t \downarrow$
  - => elektrischer Widerstand  $\uparrow$
  - => Potentialdifferenz  $\uparrow$  ( $U = R \cdot I$ )
- Risslängenbestimmung über eine zuvor (in Kalibrierversuchen) aufgenommene Funktion  $a(U)$

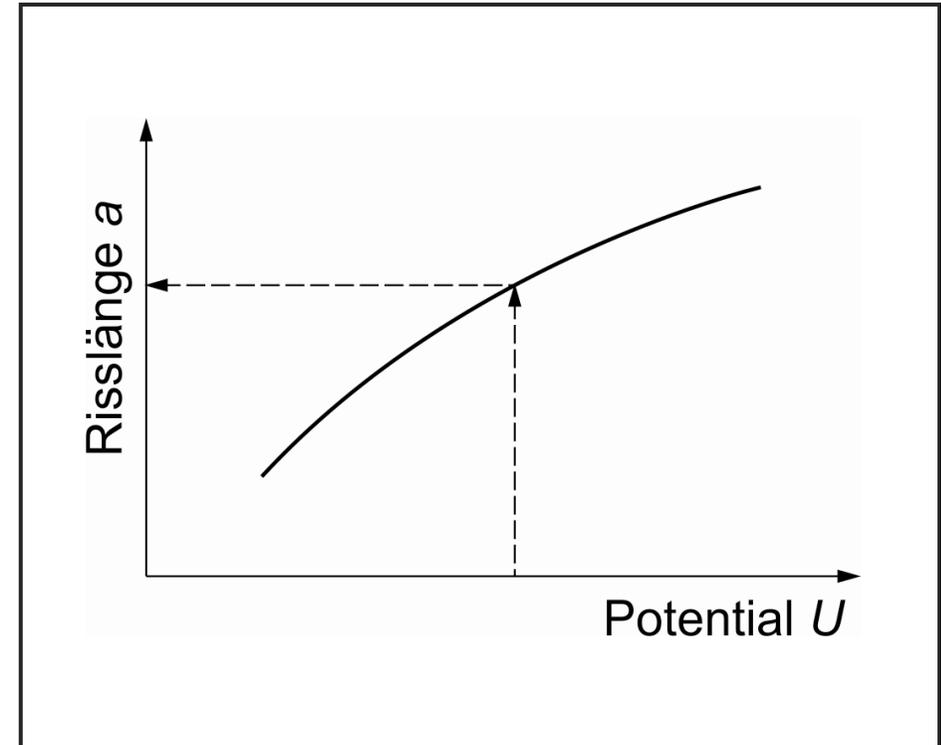


## Bruchmechanische Untersuchungen

### Messmethode:

#### Elektropotentialverfahren

- Einspeisung des konstanten Stroms in die Probe
- Messung des Spannungsabfalls
- Rissverlängerung durch  $F(t)$ 
  - => Restquerschnitt  $(w-a) \cdot t \downarrow$
  - => elektrischer Widerstand  $\uparrow$
  - => Potentialdifferenz  $\uparrow$  ( $U = R \cdot I$ )
- Risslängenbestimmung über eine zuvor (in Kalibrierversuchen) aufgenommene Funktion  $a(U)$



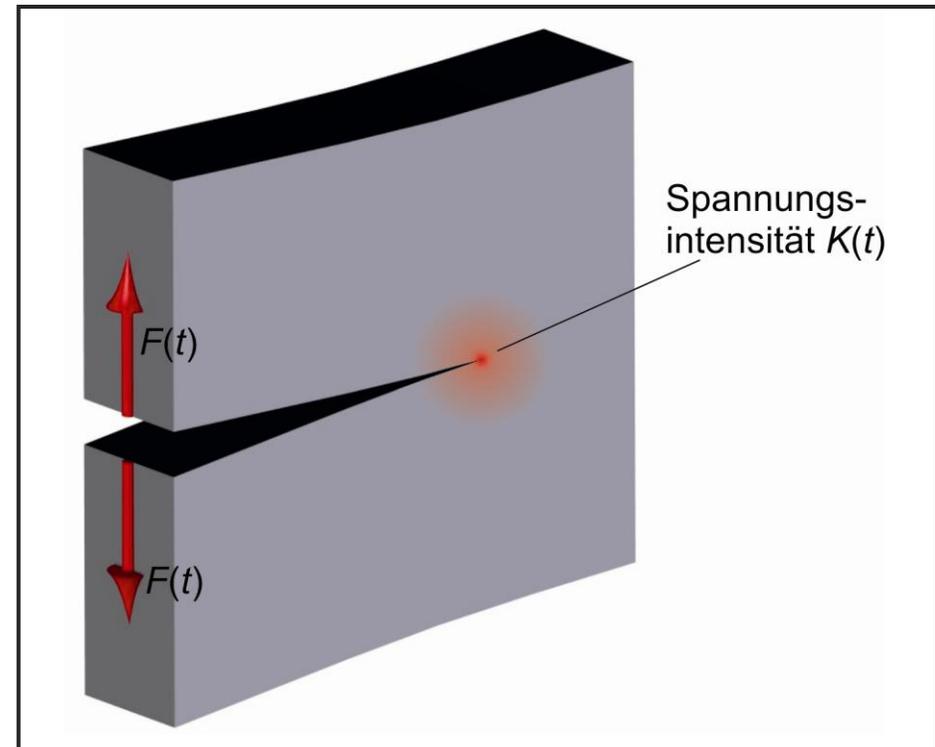
## Bruchmechanische Untersuchungen

### Bestimmung des Schwellenwertes der Ermüdungsrissausbreitung in einem Absenkversuch

#### Vorgehensweise:

- Spannungsintensität  $K$  als Beanspruchungsgröße an der Risspitze treibt den Riss voran
- $K$  ist direkt proportional zu  $\sigma$  und  $\sigma$  zu  $F$  (somit auch  $\Delta F$  zu  $\Delta K$ )
- Bewusste Rissinitiierung aus der Spitzkerbe
- Absenkung von  $\Delta K$  bis kein Risswachstum mehr stattfindet  
=> Schwellenwert  $\Delta K_{th}$  ist bestimmt

Kein Risswachstum für  $\Delta K < \Delta K_{th}$  !



$$K = \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \cdot Y \text{ bzw. } \Delta K = \Delta \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \cdot Y$$

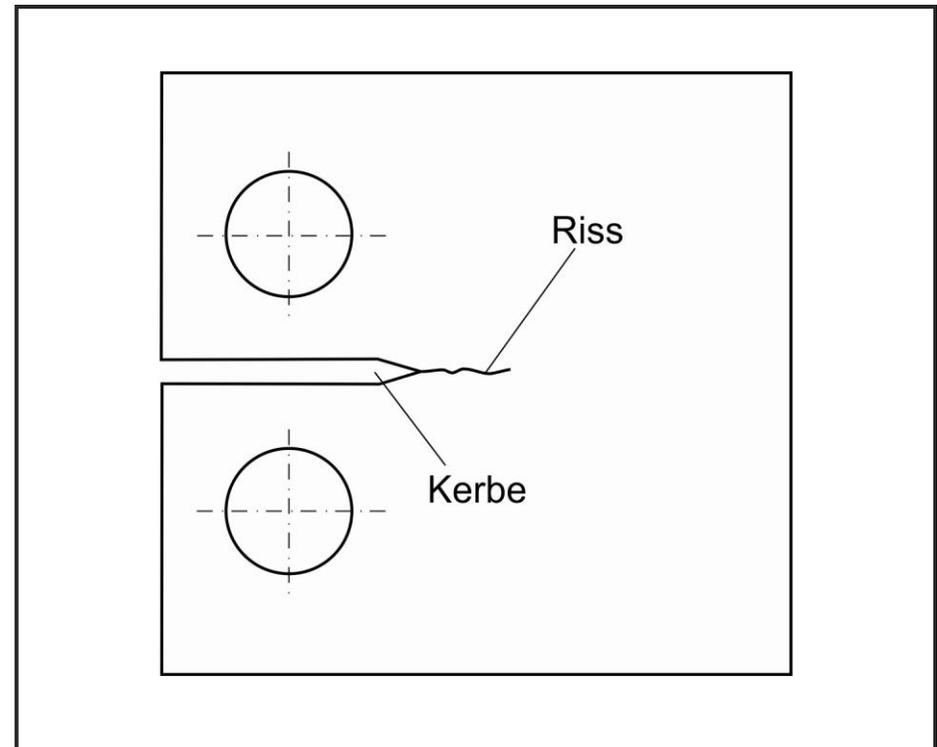
## Bruchmechanische Untersuchungen

### Bestimmung des Schwellenwertes der Ermüdungsrissausbreitung in einem Absenkversuch

#### Vorgehensweise:

- Spannungsintensität  $K$  als Beanspruchungsgröße an der Risspitze treibt den Riss voran
- $K$  ist direkt proportional zu  $\sigma$  und  $\sigma$  zu  $F$  (somit auch  $\Delta F$  zu  $\Delta K$ )
- Bewusste Rissinitiierung aus der Spitzkerbe
- Absenkung von  $\Delta K$  bis kein Risswachstum mehr stattfindet  
=> Schwellenwert  $\Delta K_{th}$  ist bestimmt

Kein Risswachstum für  $\Delta K < \Delta K_{th}$  !



$$K = \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \cdot Y \text{ bzw. } \Delta K = \Delta \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \cdot Y$$

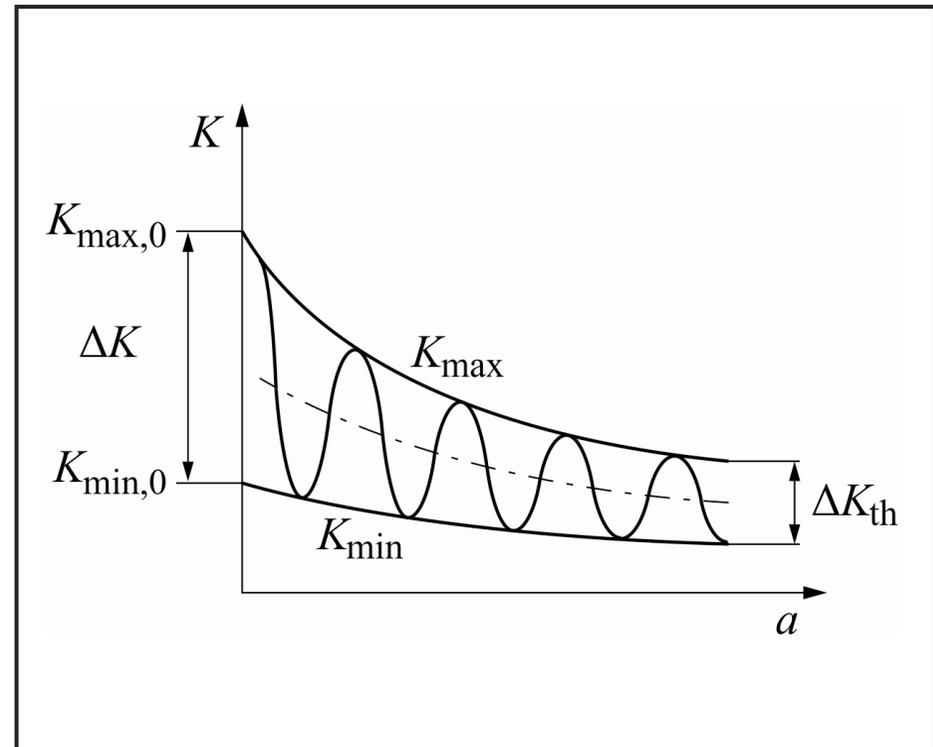
## Bruchmechanische Untersuchungen

### Bestimmung des Schwellenwertes der Ermüdungsrissausbreitung in einem Absenkversuch

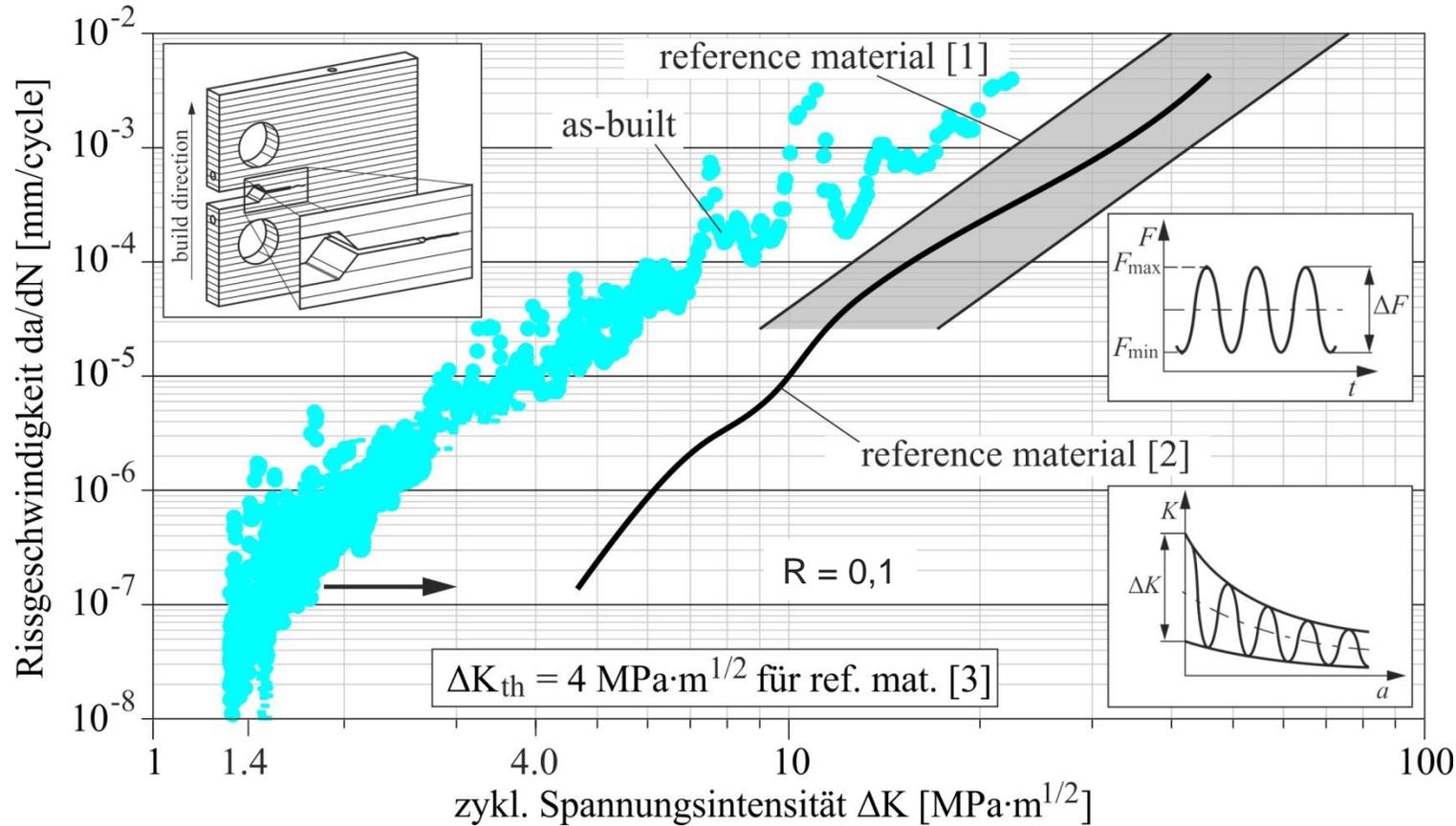
#### Vorgehensweise:

- Spannungsintensität  $K$  als Beanspruchungsgröße an der Risspitze treibt den Riss voran
- $K$  ist direkt proportional zu  $\sigma$  und  $\sigma$  zu  $F$  (somit auch  $\Delta F$  zu  $\Delta K$ )
- Bewusste Rissinitiierung aus der Spitzkerbe
- Absenkung von  $\Delta K$  bis kein Risswachstum mehr stattfindet  
=> Schwellenwert  $\Delta K_{th}$  ist bestimmt

Kein Risswachstum für  $\Delta K < \Delta K_{th}$  !



$$K = \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \cdot Y \text{ bzw. } \Delta K = \Delta \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \cdot Y$$



as-built: große Streuung von  $da/dN$

$da/dN$ -Kurve für as-built wesentlich kritischer als die des Referenzmaterials

Schwellenwert für den as-built-Zustand:  
 $1,4 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$   
Schwellenwert Referenzmaterial:  
 $4 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$

**Optimierung notwendig**

[1] H. BLUMENAUER, G. PUSCH: Technische Bruchmechanik, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, (1993)

[2] Ti-6Al-4V by Boyce and Ritchie, 1998 obtained at 25°C, 50 Hz, R= 0.1

[3] G. MARCI: Fatigue crack growth threshold and test results for Al- and Ti-alloys, in Fatigue Crack Growth Thresholds, Endurance Limits and Design, ASTM STP 1372, Newman J.C. Jr. and Piascrik R.S. Eds., American Society for Testing and Materials, (2000)

**1. Motivation**

**2. Verhalten von SLM-Materialien bei zyklischer Belastung**

**3. Einflussfaktoren auf die Ermüdung**

**4. Optimierung des Ermüdungsverhaltens**

**5. Ausblick**

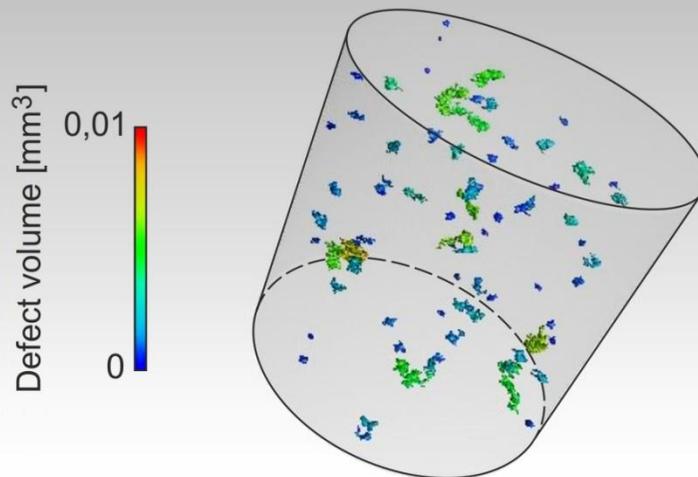


## Werkstoffzustand

### Porosität

#### Messverfahren: Computertomografie

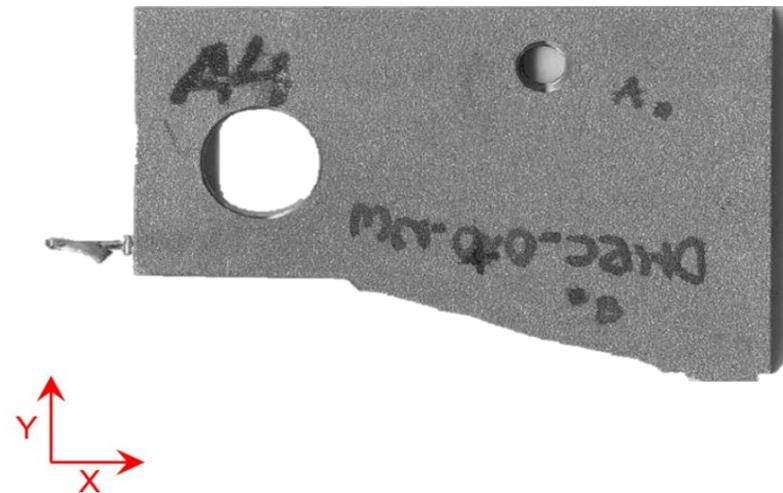
- Werkstoffzustand: as-built
- Auflösung des Messsystems: 22  $\mu\text{m}$
- Untersuchtes Volumen: 100  $\text{mm}^3$



### Eigenspannungen

#### Messverfahren: Röntgendiffraktometrie

- Werkstoffzustand: as-built
- Messung an 2 Positionen
- Messung in x- und y-Richtung



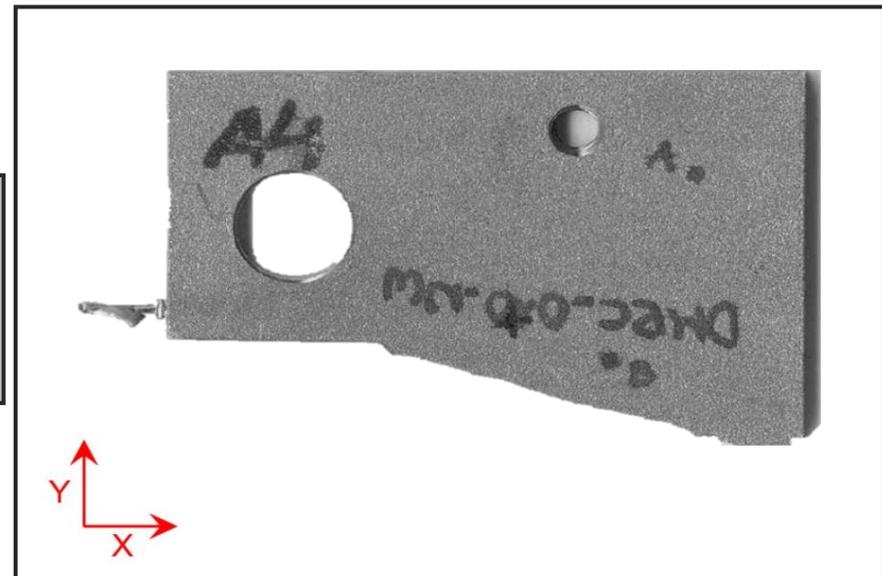
## Werkstoffzustand

### Eigenspannungen

#### Messverfahren: Röntgendiffraktometrie

- Werkstoffzustand: as-built
- Messung an 2 Positionen
- Messung in x- und y-Richtung

Werkstoffzustand / Messpunkt	Eigenspannungen $\sigma_{ES}$ [MPa] in x-Richtung	Eigenspannungen $\sigma_{ES}$ [MPa] in y-Richtung
as-built / Position A	+90 ±5	+235 ±15
as-built / Position B	+120 ±5	+215 ±10



**1. Motivation**

**2. Verhalten von SLM-Materialien bei zyklischer Belastung**

**3. Einflussfaktoren auf die Ermüdung**

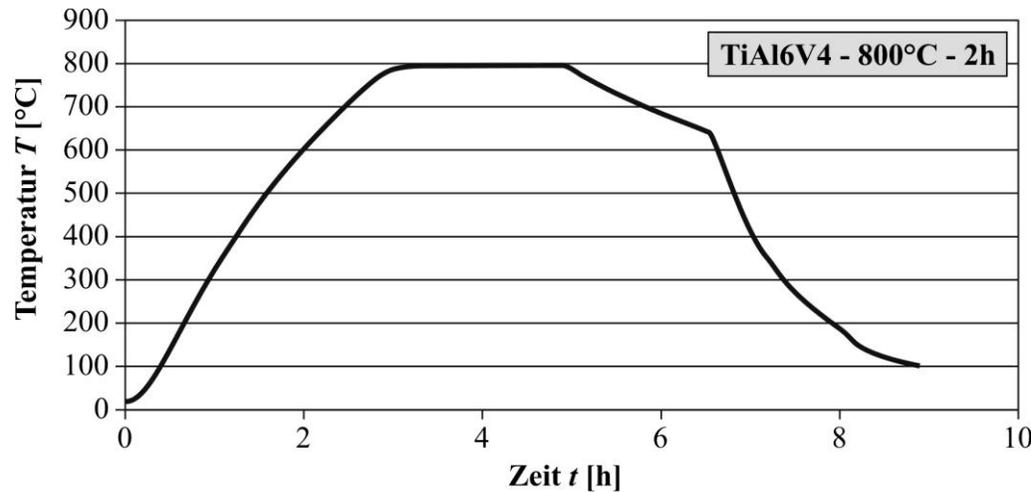
**4. Optimierung des Ermüdungsverhaltens**

**5. Ausblick**



## Wärmebehandlungen zur Minimierung von Eigenspannungen und Porosität

case	“800 °C”	“1050 °C”	“HIPed”
Temperature [°C]	800	1050	920 (1000 bar)
Time [h]	2	2	2
Atmosphere	Argon	Vacuum	Argon

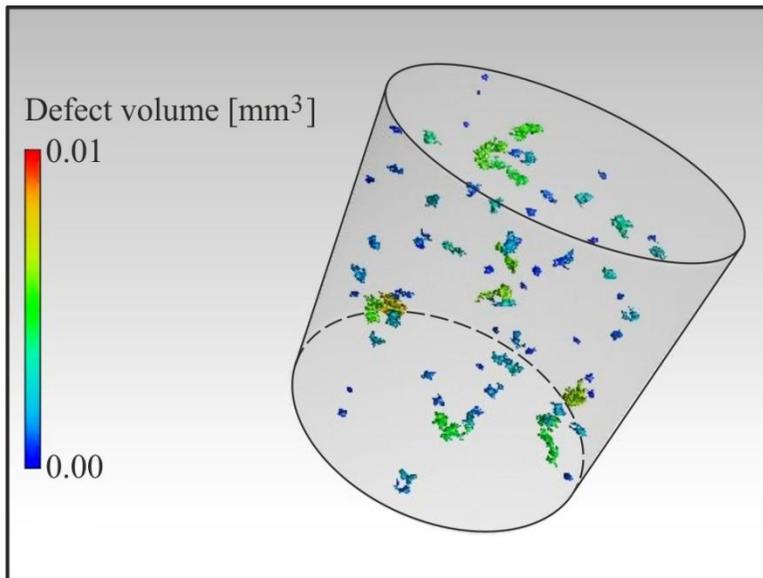


## Werkstoffzustand

### Porosität

#### Messverfahren: Computertomografie

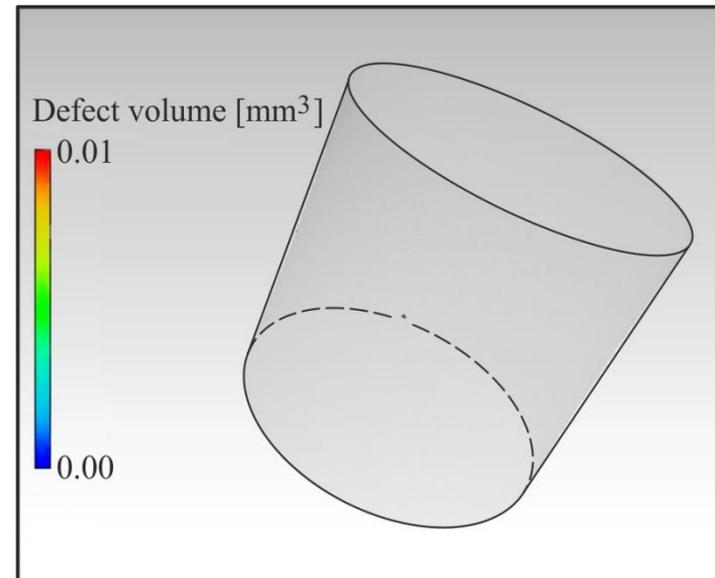
- Werkstoffzustand: **as-built**
- Auflösung des Messsystems: 22  $\mu\text{m}$
- Untersuchtes Volumen: 100  $\text{mm}^3$



### Porosität

#### Messverfahren: Computertomografie

- Werkstoffzustand: **HIPed**
- Auflösung des Messsystems: 22  $\mu\text{m}$
- Untersuchtes Volumen: 100  $\text{mm}^3$



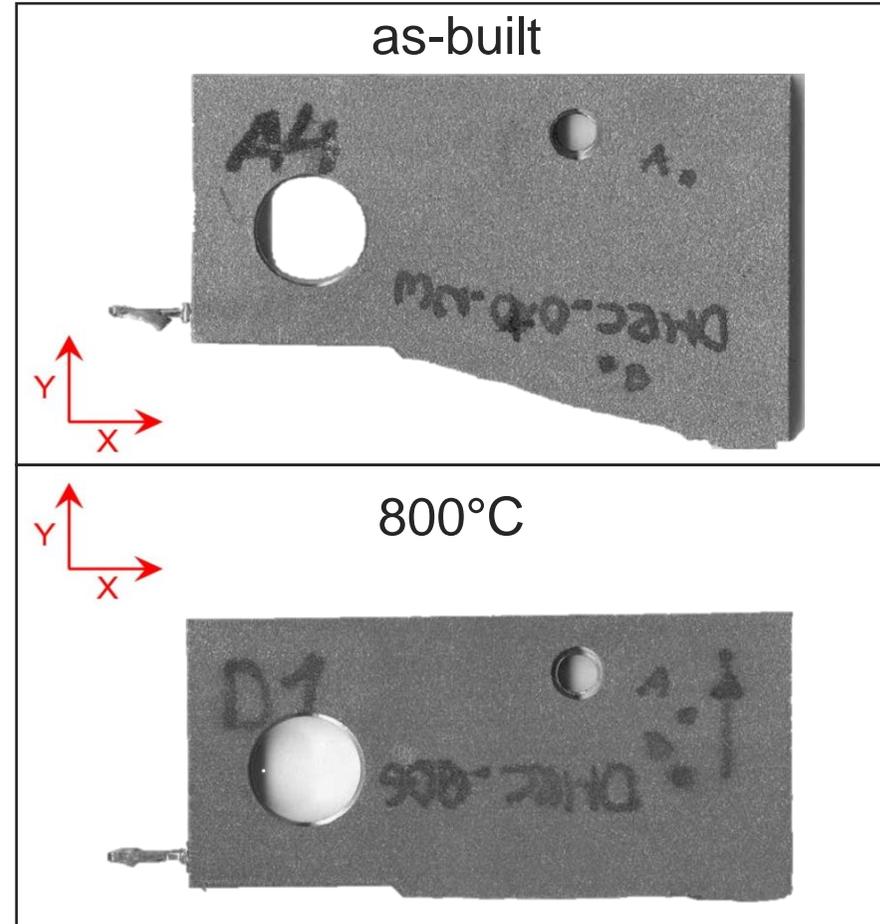
## Werkstoffzustand

### Eigenspannungen

#### Messverfahren: Röntgendiffraktometrie

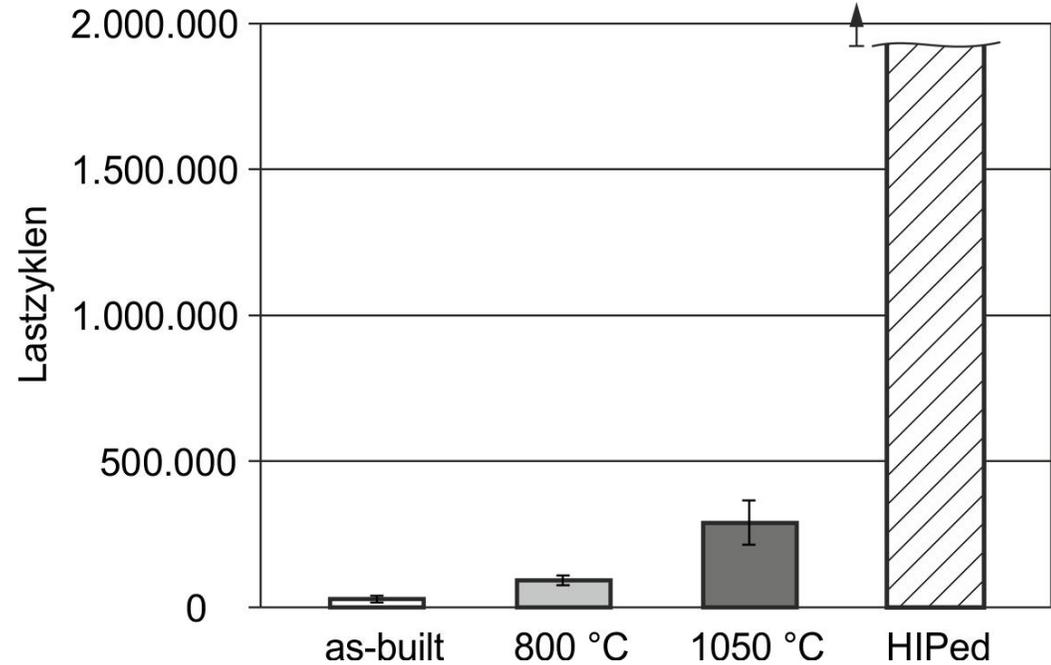
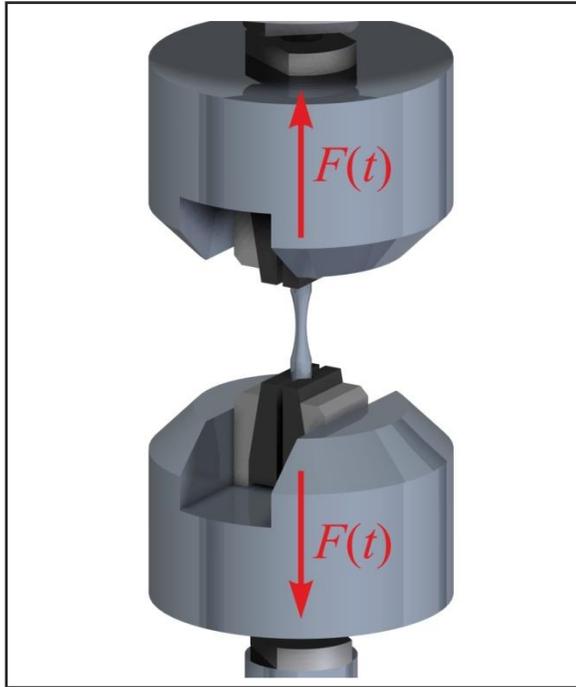
- Werkstoffzustand: **as-built/800°C**
- Messung an 2 Positionen
- Messung in x- und y-Richtung

Werkstoff-zustand / Messpunkt	Eigenspannungen $\sigma_{ES}$ [MPa] in x-Richtung	Eigenspannungen $\sigma_{ES}$ [MPa] in y-Richtung
as-built / Position A	+90 ±5	+235 ±15
as-built / Position B	+120 ±5	+215 ±10
800° / Position A	-5 ±5	+10 ±5
800° / Position B	+5 ±5	-5 ±5



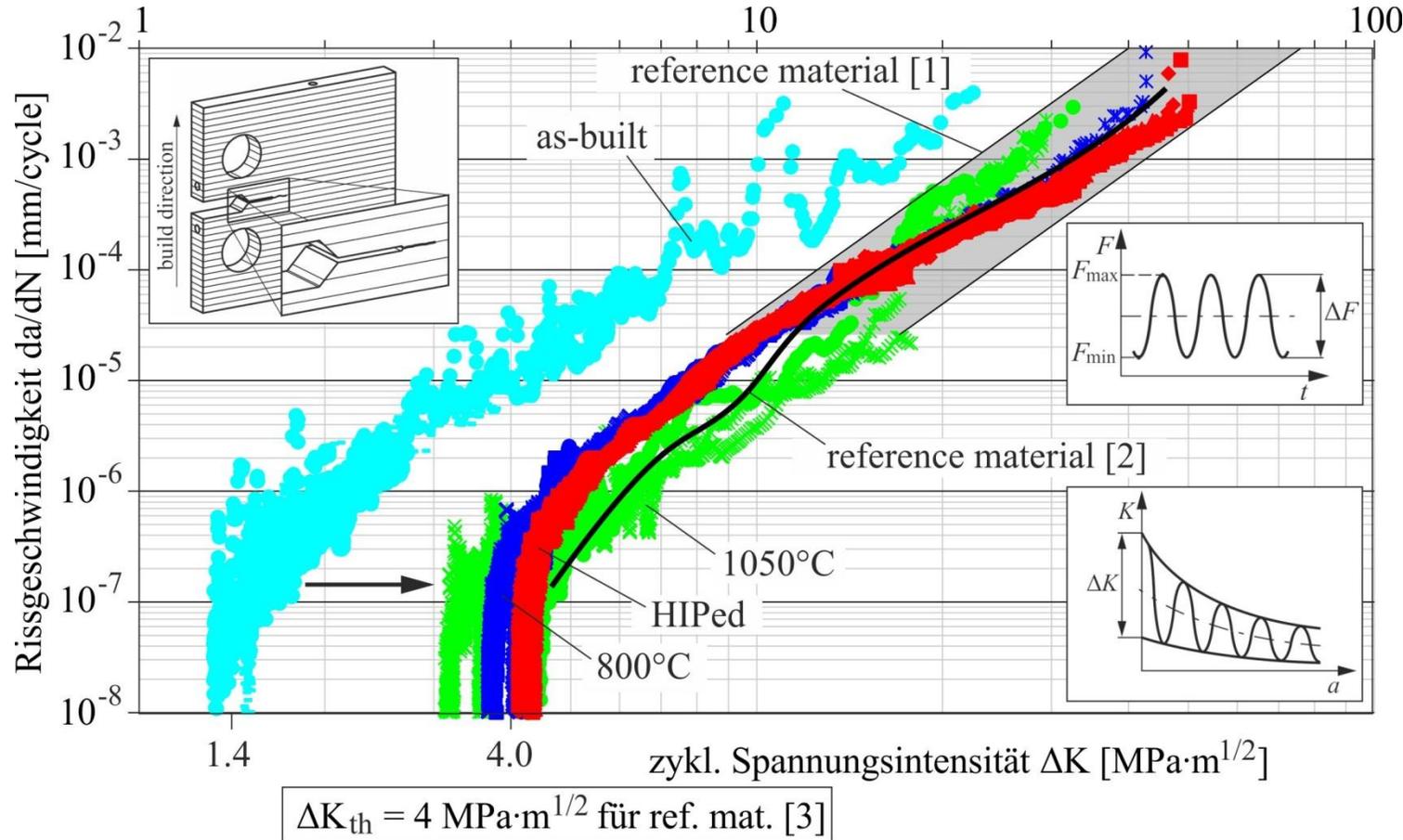
↑  
build-direction

## Schwingfestigkeitsuntersuchungen



Werkstoffzustand „HIPed“ erreicht wie das Grundmaterial  $2 \cdot 10^6$  Lastwechsel

Dauerfestigkeit für „HIPed“:  $\sigma_D = 620$  MPa (entspricht Referenzmaterial)



Verschiebung der Kurven für alle Materialzustände zu höheren Werten

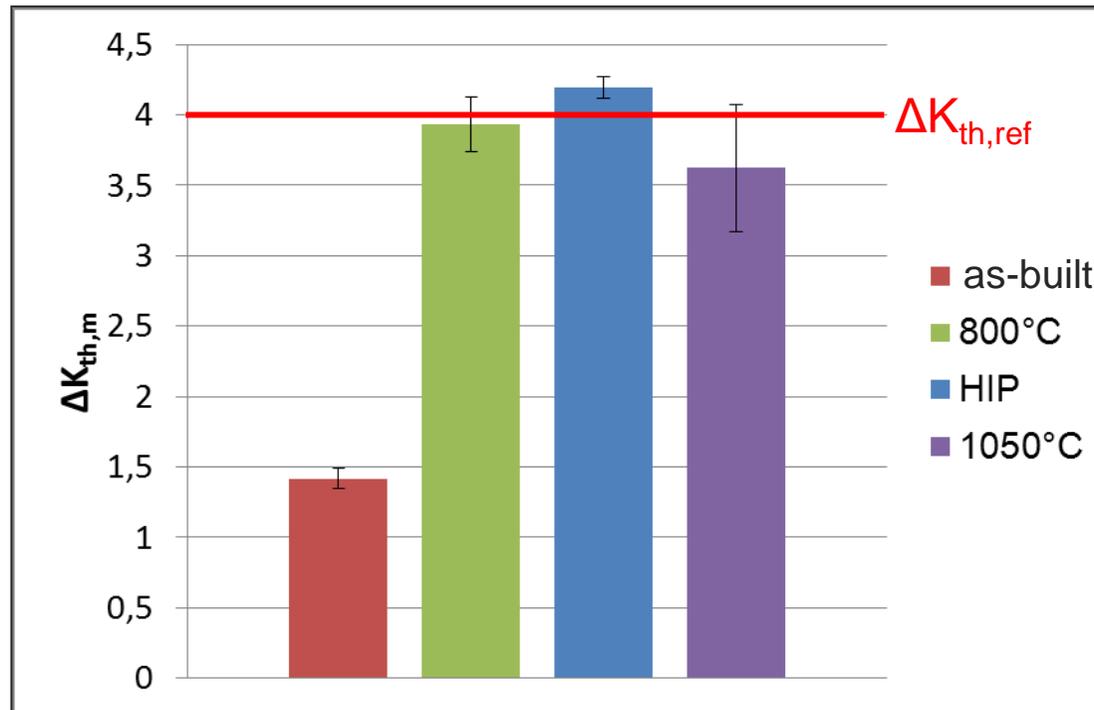
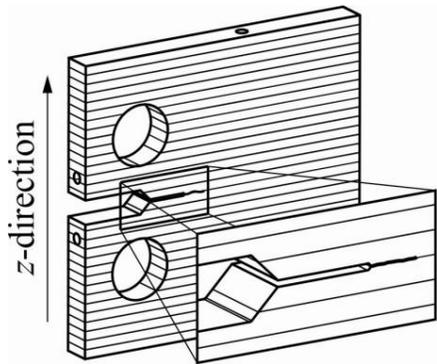
Schwellenwert der behandelten Proben:  
4 MPa·m<sup>1/2</sup>  
Schwellenwert des Referenzmaterials:  
4 MPa·m<sup>1/2</sup>

Sehr gute Übereinstimmung bereits für 800°C

- [1] H. BLUMENAUER, G. PUSCH: Technische Bruchmechanik, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, (1993)  
 [2] Ti-6Al-4V by Boyce and Ritchie, 1998 obtained at 25°C, 50 Hz, R= 0.1  
 [3] G. MARCI: Fatigue crack growth threshold and test results for Al- and Ti-alloys, in Fatigue Crack Growth Thresholds, Endurance Limits and Design, ASTM STP 1372, Newman J.C. Jr. and Piascrik R.S. Eds., American Society for Testing and Materials, (2000)

## Versuchsergebnisse für TiAl6V4

- Erhöhung des Schwellenwertes um den Faktor 3
- 800°C als kosteneffiziente Behandlung: hohe Reproduzierbarkeit,  $\Delta K_{th}$  entspricht dem Referenzmaterial



**1. Motivation**

**2. Verhalten von SLM-Materialien bei zyklischer Belastung**

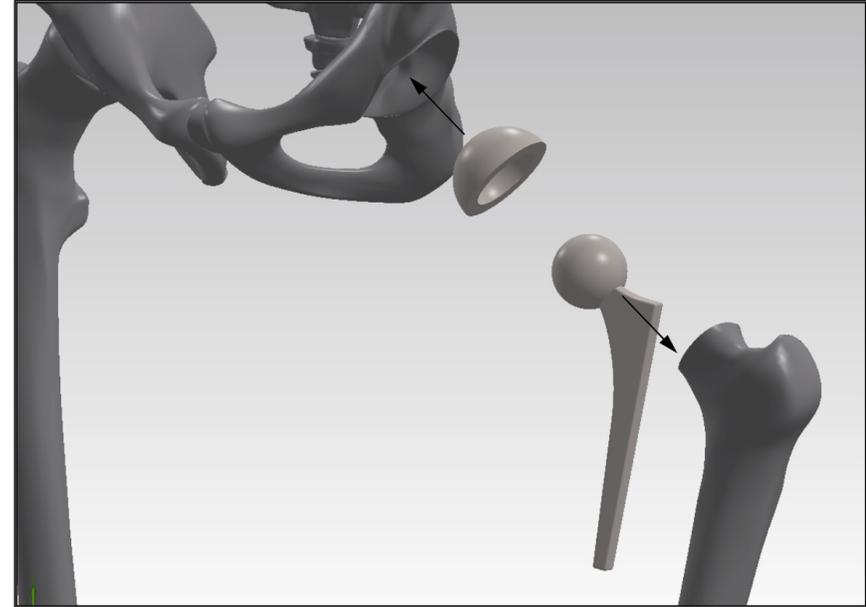
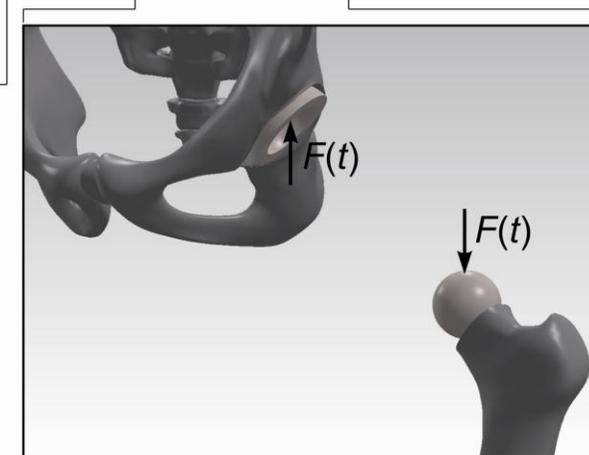
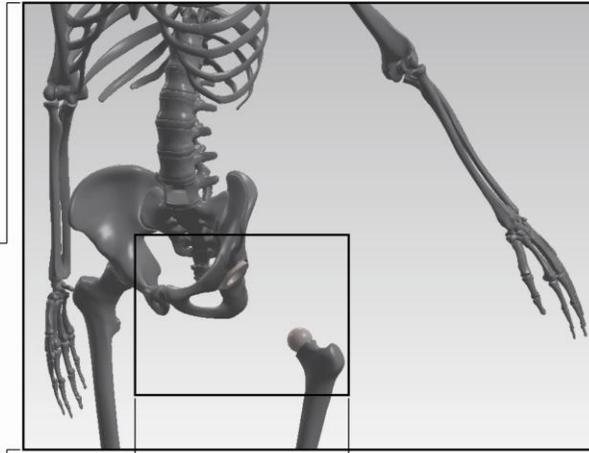
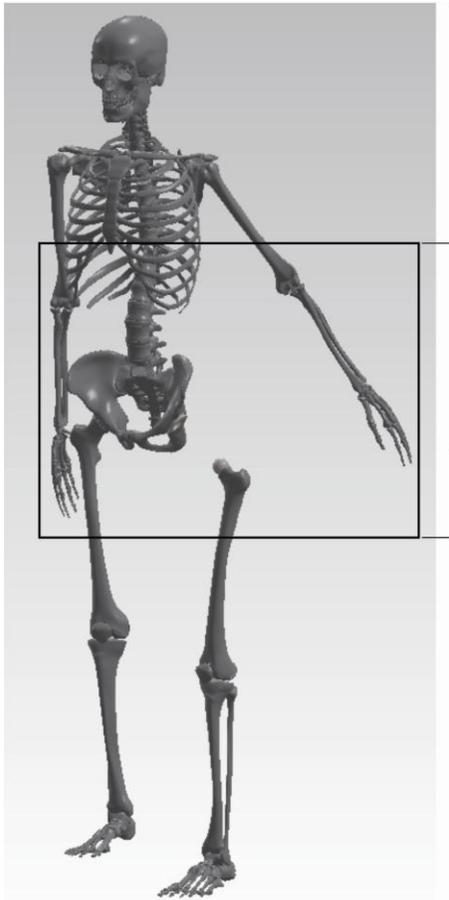
**3. Einflussfaktoren auf die Ermüdung**

**4. Optimierung des Ermüdungsverhaltens**

**5. Ausblick**

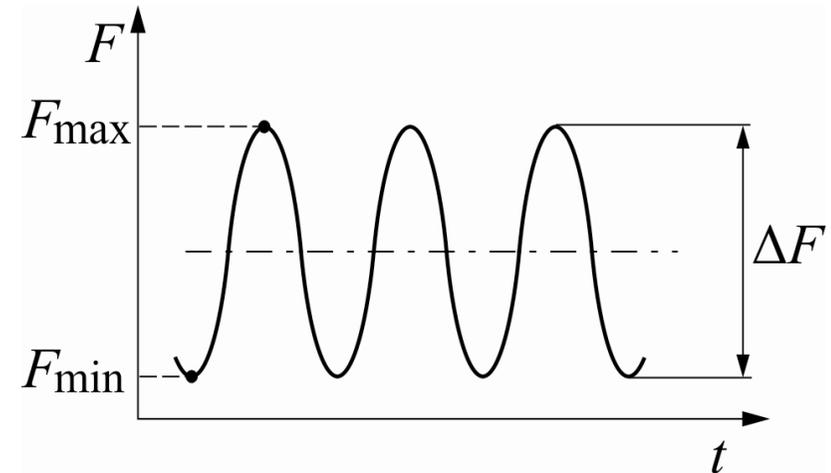
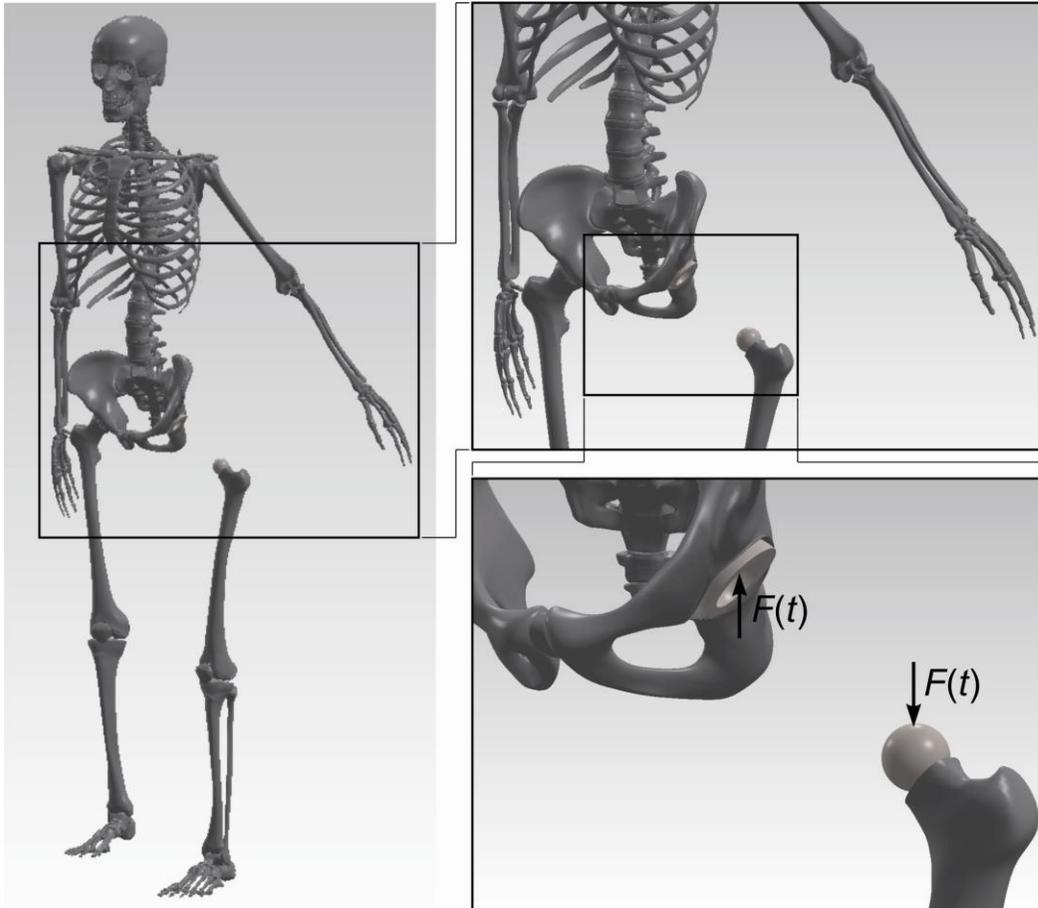


Numerische Untersuchung der Rissausbreitung sowie der Restlebensdauer

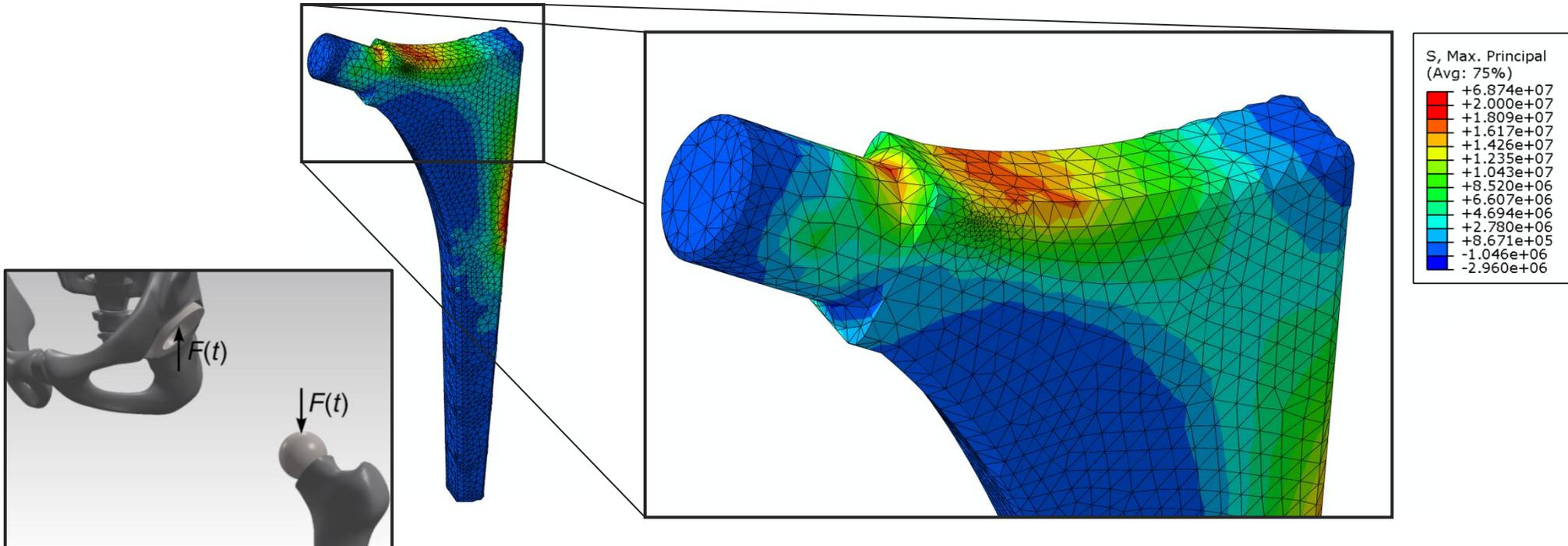


Auftreten einer zyklischen Belastung beim Gehen

Numerische Untersuchung der Rissausbreitung sowie der Restlebensdauer

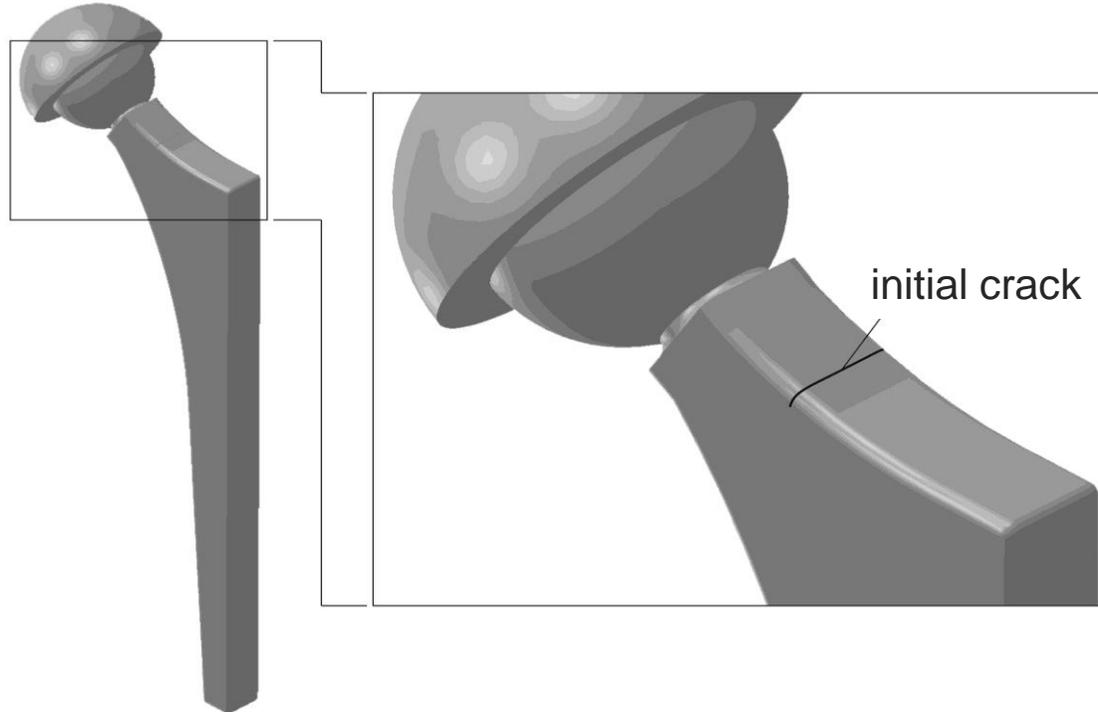


Numerische Untersuchung der Rissausbreitung sowie der Restlebensdauer



Finite-Elemente-Analyse zur Ermittlung der Hauptnormalspannung

## Numerische Untersuchung der Rissausbreitung sowie der Restlebensdauer



- Werkstoff: TiAl6V4
- Berücksichtigte Werkstoffzustände: “800°C” und “as-built”
- Ist der Riss ausbreitungsfähig?
- Vergleich der Restlebensdauer der Materialzustände “800°C” und “as-built”

Thank you!



www.dmrc.de



SIEMENS



# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit