

# **Probabilistische Finite-Elemente Analysen zum Einfluss von Materialstreuungen auf die Lebensdauer einer einkristallinen Turbinenschaufel**

**Thomas Weiß, Hartmut Schlums**

Rolls-Royce Deutschland Ltd & Co KG, Dahlewitz

**Zusammenfassung:** Turbinenschaufeln von Fluggasturbinen sind komplexen Betriebsbeanspruchungen bei hohen Einsatztemperaturen ausgesetzt. Neben den Betriebsbeanspruchungen haben die Materialeigenschaften einen direkten Einfluss auf die Bauteillebensdauer. Da die Materialeigenschaften bestimmten, quantifizierbaren Streuungen unterworfen sind, ist die probabilistische Abschätzung der Bauteillebensdauer unter Berücksichtigung dieser Streuungen von besonderer Bedeutung. Zur probabilistischen Analyse der Lebensdauer von Bauteilen unter Berücksichtigung stochastischer Eingabevariablen wurde an der TU Dresden die Probabilistik-Software ProSi entwickelt ([1], [2]). Mit Hilfe von ProSi wurden probabilistische Untersuchungen zur Lebensdauer einer Turbinenschaufel der einkristallinen Superlegierung CMSX-4 unter Berücksichtigung von Materialstreuungen durchgeführt. Um den numerischen Aufwand probabilistischer Analysen eines 3D-Schaufelmodells zu reduzieren, wurde exemplarisch für ein lebensdauerkritisches Gebiet der Turbinenschaufel ein Submodell aufgebaut. Die Festigkeitsanalysen erfolgten dabei mit Hilfe des Finite-Elemente Programms Abaqus mit selbst entwickelten Unterprogrammen zur Werkstoffmodellierung und Lebensdauerabschätzung.

## **Einleitung**

Validierte Lebensdauervorhersagen sind essentieller Bestandteil des Entwicklungsprozesses effizienter, zuverlässiger und wettbewerbsfähiger Flugtriebwerkskomponenten. Verbesserte Lebensdauererhaltungsmethoden haben eine optimierte Werkstoffausnutzung zum Ziel ohne dabei Sicherheits- und Zuverlässigkeitsstandards der Komponente zu beeinträchtigen. Moderne Turbinenschaufeln bestehen in der Regel aus Nickelbasis-Legierungen, wobei zunehmend gerichtet erstarrte einkristalline Superlegierungen zum Einsatz kommen. Dabei unterliegt die Ausrichtung des Einkristalls innerhalb der Schaufel fertigungsbedingt gewissen Schwankungen. Zuverlässige Auslegungsmethoden sollten dementsprechend neben den komplexen thermo-mechanischen Belastungen auch solche Toleranzen berücksichtigen.

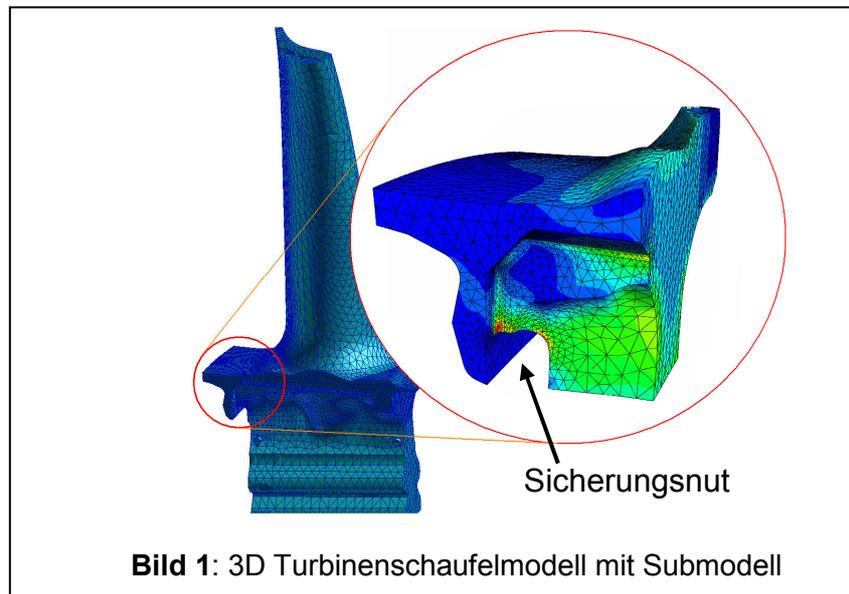
Innerhalb der vorliegenden Arbeit wurde das Schädigungsverhalten innerhalb einer Turbinenschaufel bestehend aus der einkristallinen Superlegierung CMSX-4 unter idealisierten Lastbedingungen untersucht. Hierfür wurde ein kritischer Bereich einer Turbinenschaufel als geeignetes Submodell ausgewählt und mit Hilfe verschiedener Finite-Elemente Tools aufbereitet, um anschließend eine Lebensdaueranalyse für verschiedene lebensdauerbeeinflussende Parameter durchzuführen. Im folgenden Abschnitt soll zunächst der Werkstoff und das Submodell erläutert werden.

## Werkstoff und Submodell

Der einkristalline Turbinenschaufelwerkstoff CMSX-4 wurde in den 80-er Jahren von der Cannon-Muskegon Corporation entwickelt, wobei Nickel, Chrom, Cobalt, Molybdän, Aluminium, Titan und Tantalum die Hauptlegierungselemente sind. Die entscheidende Weiterentwicklung von CMSX-4 gegenüber vorhergegangenen Legierungen war die Zulegierung von 3 Gewichtsprozent Rhenium, wodurch eine Erhöhung der Einsatztemperatur um ca. 20-35K erreicht [3]. Dies ermöglicht eine Steigerung des Wirkungsgrades von Turbinen, welcher stark von der Heißgastemperatur abhängig ist. Die exakte chemische Zusammensetzung ergibt sich allerdings nicht ausschließlich aus den Anforderungen an die Belastung, sondern auch an die speziellen Herstellungsverfahren einkristalliner Turbinenschaufeln und stellt somit einen Kompromiss zwischen beiden dar.

Die in dieser Arbeit untersuchte Komponente bezieht sich auf die Turbinenschaufel der zweiten Turbinenstufe eines Rolls-Royce Flugtriebwerkes. Aus dieser Turbinenschaufel wurde der in

**Bild 1** dargestellte Bereich als Submodell zur Analyse ausgewählt, um den numerischen Aufwand zu verringern, der mit einer Analyse der Gesamtschaufel verbunden ist. Das Submodell umfaßt eine in Umfangsrichtung verlaufende Nut (locking plate groove) für die Sicherungsplatte (locking plate),



**Bild 1:** 3D Turbinenschaufelmodell mit Submodell

welche die Schaufel in axialer Richtung arretiert. Über den kompletten Umfang der Nut sind mehrere dieser Sicherungsplatten nebeneinander angeordnet.

Im Betrieb platten sich diese Sicherungsplatten an der radialen Außenseite leicht ab, sodass eine lang gezogene Auflagefläche entsteht, die bis zu 50% der Länge der gesamten Nut einnehmen kann. Unter Betriebsbedingungen treten im Schaufelkörper in Nutnähe lokal hohe Spannungen auf, die ein örtliches Kriechen des Materials zur Folge haben können. Eine potentiell hieraus resultierende lokale Kriechschädigung soll im folgenden probabilistischen Analyseprozeß mit berücksichtigt werden. Essentiell für die Belastbarkeit der Turbinenschaufel ist die Ausrichtung der einkristallinen Struktur innerhalb der Schaufel. Aufgrund von herstellungsbedingten Ungenauigkeiten und Unzulänglichkeiten bei der Herstellung der Schaufelkomponenten beim eingesetzten Vakuum-Feinguss-Verfahren kann allerdings nicht gewährleistet werden, dass der Einkristall innerhalb jeder Schaufel gleich und in optimaler, radialer Richtung ausgerichtet ist. Es ist bekannt, dass die Orientierung der Kristallstruktur innerhalb gewisser Toleranzen variiert, allerdings ist der Einfluss dieser Streuung auf

die Lebensdauer des Bauteils bislang noch weitgehend unbekannt und soll daher im folgenden untersucht werden.

### FE-Analyse Submodell

Ein Flugtriebwerk durchläuft im Flugbetrieb mehrere Belastungszustände, wobei die Startphase in der Regel die höchste Ermüdungsbelastung für eine Turbinenschaufel darstellt. Um den Einfluß der Belastungsgeschichte numerisch effizient zu berücksichtigen, wird die Finite-Elemente Analyse mit idealisierten Belastungszyklen durchgeführt. Der idealisierte Belastungszyklus sieht eine anfängliche Belastung der Komponente im Leerlaufzustand (Idle) vor und wächst dann innerhalb einer Sekunde auf die für das Triebwerk größte Belastung an, die maximale Belastung beim Start (MTO - Maximum Take Off). Die so genannten MTO-Bedingungen werden für 2 Minuten gehalten und daraufhin wieder innerhalb einer Sekunde auf Idle-Bedingung abgesenkt. Da inelastische Verformungsvorgänge, wie zum Beispiel Kriechen, stark zeitabhängig sind und sich im realen Triebwerksleben über mehrere Flugzyklen hinweg aufbauen, müssen auch in der FE-Analyse mehrere Zyklen simuliert werden um eine verlässliche Aussage über das akkumulative Schädigungsverhalten ableiten zu können. Um ein zeitaufwendiges hundertfaches Wiederholen des idealisierten Zyklus' zu vermeiden, werden einzelne Grundzyklen in sogenannten *äquivalenten Zyklen* zusammengefaßt. Dieses Rolls-Royce intern entwickelte Vorgehen [5] ist schematisch in Tabelle 1 für den Fall einer Haltezeit von 120 Sekunden dargestellt. Der erste *äquivalente Zyklus* repräsentiert exakt den eigentlichen Testzyklus mit der maßgebenden Belastungsrate und der entsprechenden Haltezeit (hier 120s). Der zweite *äquivalente Zyklus* simuliert die nächsten drei Testzyklen mit entsprechend vergrößerter Haltezeit (hier 360s), um den Einfluß der während der Haltezeit ablaufenden Kriechrelaxation adäquat zu berücksichtigen. Der dritte *äquivalente Zyklus* simuliert dann die nachfolgenden 10 Testzyklen mit den entsprechenden zehnfachen Haltezeiten (vgl. Tabelle 1).

Die beschriebene Vorgehensweise reduziert somit den numerischen Aufwand für die Simulation des zyklischen Verhaltens bis zum Erreichen des zyklisch stabilisierten Spannungs-Dehnungszustandes im untersuchten kritischen Bereich. So genügte bei den FE-Simulationen die Vorgabe von 6 äquivalenten Zyklen entsprechend 444 Testzyklen, um ein quasi-stabilisiertes zyklisches Verhalten im kritischen Gebiet zu erreichen. Diese Vorgehensweise ließe sich ohne weiteres auch auf noch mehr Zyklen gemäß der „1-3-10-30-Regel“ erweitern.

**Tabelle 1:** Definition der *äquivalenten Zyklen* mit Haltezeiten

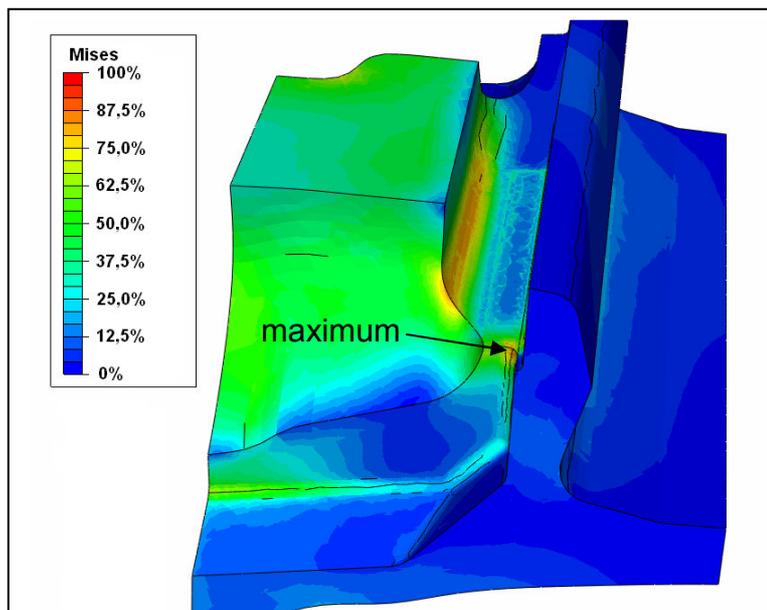
Äquivalenter Zyklus $i$	Äquivalenter Flugzyklus	Faktor $zyk_i$	Haltezeit auf MTO - $t_{dwell i}$	Entlastung auf Idle
1	1	1	120 s	1 s
2	2 - 4	3	360 s	3 s
3	5 - 14	10	1200 s	10 s
4	15 - 44	30	3600 s	30 s
5	45 - 144	100	12000 s	100 s
6	145 - 444	300	36000 s	300 s
7	445 - 1444	1000	120000 s	1000 s

Die Geometrie für das Submodell wurde mit Hilfe des Programms Patran aufbereitet. Außerdem wurden in Patran sämtliche Vernetzungsparameter definiert sowie die Vernetzung selbst durchgeführt. Die Aufprägung aller Randbedingungen erfolgte mit der Rolls-Royce eigenen FE-Software SC03. Als zu definierende Randbedingungen zählten dabei die Temperaturverteilung unter Idle- und MTO-Bedingungen über das Modell und die Lasteinleitung der Sicherungsplatte in der Schaufelnut. Von besonderer Bedeutung war die Definition der Submodellrandbedingungen zu beiden Belastungszuständen, das heißt die Verschiebungsgrößen an den Schnittflächen des Submodells zum Rest des Originalmodells. Dazu wurde das vollständige Modell einem rein elastischen Grundzyklus unterzogen. Dies war ausreichend, um die Verschiebungsgrößen hinreichend genau zu bestimmen, da die maßgebende Verschiebung an den Schnittflächen durch die thermo-elastische Ausdehnung zustande kommt. Die eigentliche FE-Analyse des Submodells wurde allerdings mit dem kommerziellen Programm Abaqus (Version 6.7) durchgeführt. Dies geschah aufgrund der sehr guten Möglichkeit, die Eingabedateien für die FE-Analyse einfach im ASCII-Format editieren zu können und Ergebnisdaten ebenso einfach in ASCII-Dateien zugänglich zu haben. Außerdem ist das Post-Processing Tool Abaqus CAE sehr gut mit Hilfe der Programmiersprache Python „skriptbar“, was die Auswertung der Daten sehr erleichtert.

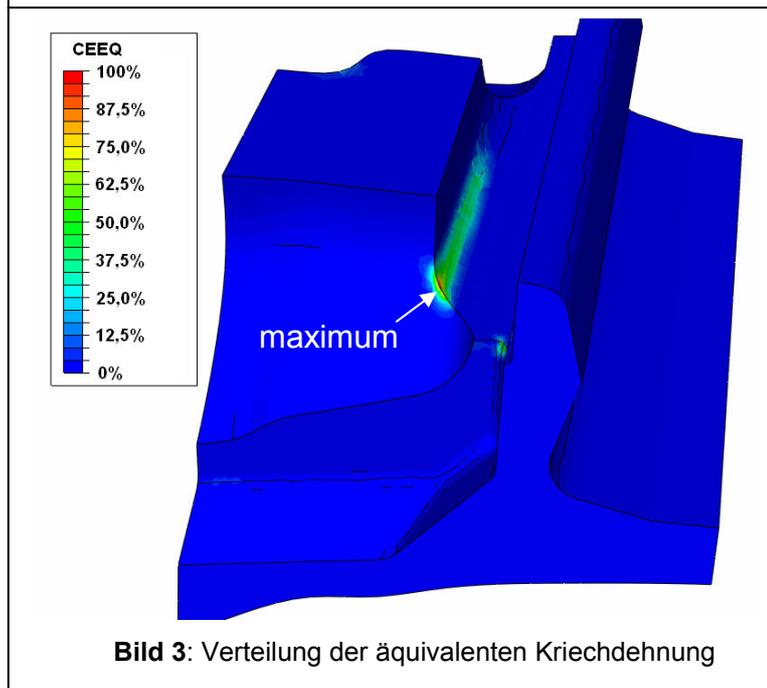
## Lebensdauervorhersage

Die im Zuge der FE-Analyse jeweils durchgeführte Lebensdauervorhersage berücksichtigt den aus niederzyklischer Ermüdung (LCF = Low Cycle Fatigue) und Kriechdeformation resultierende Schädigung. Hierbei wird von folgenden Annahmen ausgegangen: Die LCF-Schädigung ist neben der Temperatur abhängig von der maximalen und minimalen Mises-Spannung innerhalb

eines äquivalenten Zyklus'. **Bild 2** stellt die Verteilung der Mises-Vergleichsspannung über das Submodell in der Schaufelnut zum Zeitpunkt der maximalen Belastung dar. Die maximale Mises-Spannung tritt im Übergangsradius der Schaufelnut auf (siehe Bild 2). Davon ausgehend wurde die LCF-Schädigung  $D_{LCF}$  für jeden äquivalenten Zyklus separat aus der Anzahl der äquivalenten Zyklen und der vorausgesagten Lebensdauer pro Zyklus ermittelt.



**Bild 2:** Verteilung der Mises-Spannung



**Bild 3:** Verteilung der äquivalenten Kriechdehnung

**Bild 3** zeigt die Verteilung der äquivalenten Kriechdehnung im Submodell zum gleichen Zeitpunkt. Die Schädigung durch Kriechen  $D_{Creep}$  wurde durch die Ermittlung der Zeit  $t_{rupt i}$  bis zum Kriechbruchversagen in Abhängigkeit von Temperatur und Spannung nach einem Rolls-Royce internen Kriechmodell [4] ermittelt, welche daraufhin mit der Haltezeit  $t_{dwell i}$  auf MTO-Bedingung pro äquivalentem Zyklus ins Verhältnis gesetzt wurde. Die maximale Kriechdehnung stellt sich wiederum im Übergangsradius der Schaufelnut mit einem Maximum im Aussenkantenbereich ein (siehe Bild 3).

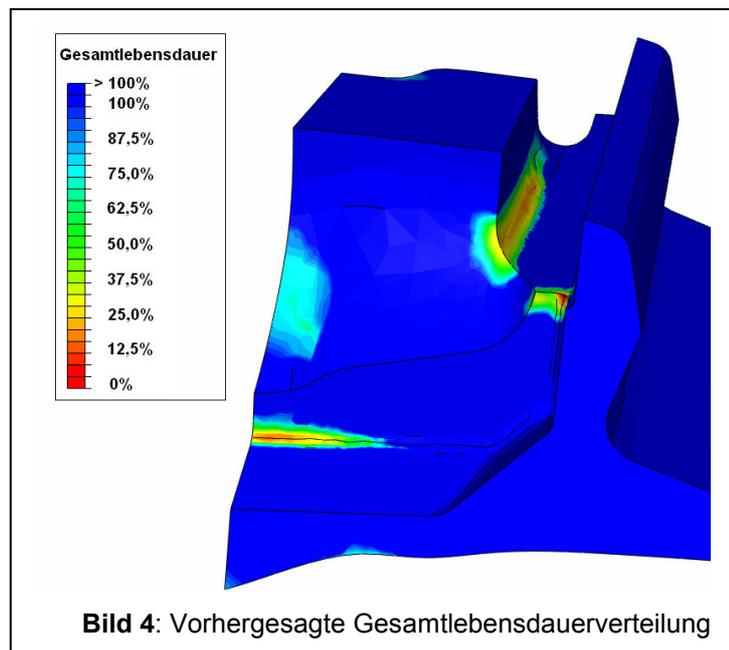
Die Gesamtschädigung ergibt sich aus einer additiven Verknüpfung sämtlicher Schädigungsbeiträge aus den einzelnen äquivalenten Zyklenschädigungen:

$$D_{total} = D_{LCF} + D_{Creep} = \sum_{i=1}^k \left( \frac{zyk_i}{N_{fi}} + \frac{t_{dwell i}}{t_{rupt i}} \right)$$

Die gesamte vorhergesagte Lebensdauer  $N_{pred}$  in Belastungszyklen ergibt sich daraus zu:

$$N_{pred} = \sum_{i=1}^k zyk_i \left\{ \sum_{i=1}^k zyk_i \left( \frac{1}{N_{fi}} + \frac{t_{dwell}}{t_{rupt i}} \right) \right\}^{-1}$$

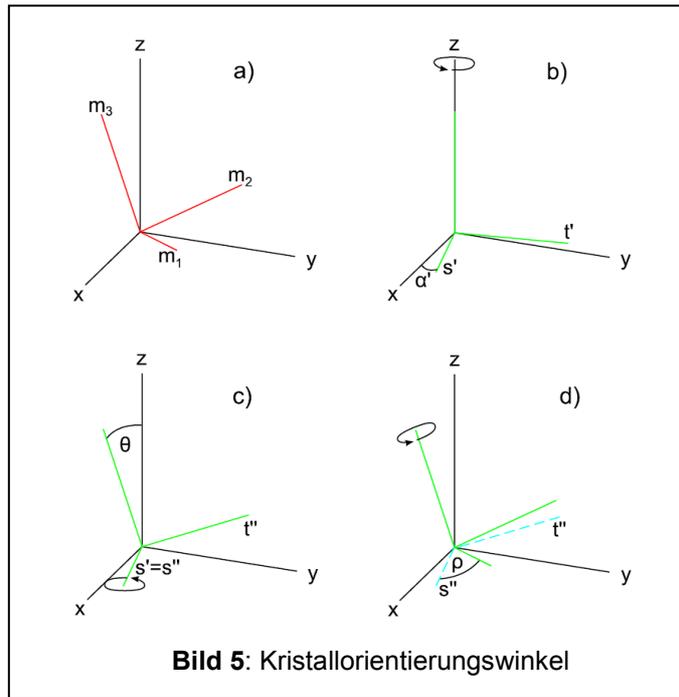
Die gesamte vorhergesagte Lebensdauer des Bauteils kann mit Abaqus CAE auch wieder als Verteilung über das gesamte Submodell dargestellt werden (**Bild 4**). In der Abbildung bezeichnet „100%“ eine die Sollvorgabe erfüllende, sichere Lebensdauer, sodass solche, die Sollvorgabe unterschreitenden, kritischen Bereiche entsprechend eingefärbt sind. Auf exakte Angaben wird aufgrund der Vertraulichkeit der Daten abgesehen.



### Probabilistische Analyse

Im vorliegenden Beitrag bestanden die streuenden Den Kern der durchgeführten probabilistischen Analyse dieser Arbeit bildet methodisch die Anwendung einer Monte-Carlo-Simulation (MCS). Die Grundlage der MCS sind häufig durchgeführte Zufallsexperimente mit deren Hilfe analytisch nur sehr aufwendig lösbare Probleme mit Methoden der Stochastik abgebildet werden können. Dazu werden zuerst die das Problem bestimmenden Parameter identifiziert. Diesen Systemparametern müssen im weiteren sinnvolle Wahrscheinlichkeitsverteilungen zugeordnet werden. Im darauf folgenden Schritt wird eine vorgegebene Anzahl von zufälligen Kombinationen aus den gestreuten Systemparametern erstellt und mit jeder dieser Kombinationen eine jeweils eigenständige Analyse durchgeführt. Die Ergebnisgrößen der Einzelanalysen werden zusammen ausgewertet, sodass man den Einfluss der Streuungen der Eingangsparameter auf die Streuung der Ergebnisgrößen darstellen kann.

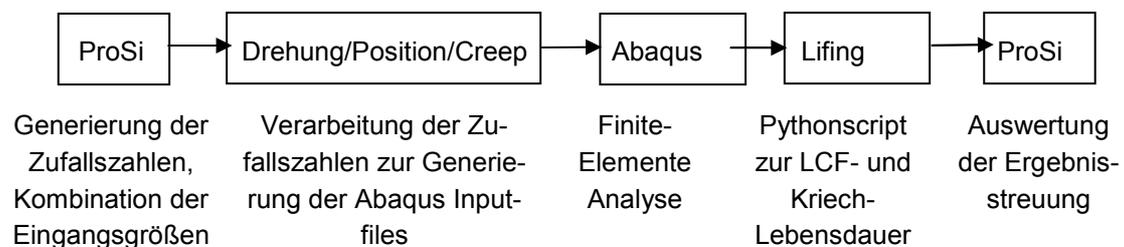
Im vorliegenden Beitrag wurden unter den ausgewählten Eingangsgrößen zunächst die die Materialorientierung bestimmenden drei Winkel  $\alpha'$ ,  $\theta$  und  $\rho$  variiert. Außerdem wurde die Position der Krafteinleitung innerhalb der Schaufelnut variiert, sowie wesentliche Parameter des zugrundegelegten Kriechgesetzes [4], womit materialbedingte Streuungen in der Kriechfestigkeit abgebildet werden sollen. **Bild 5** veranschaulicht, wie nacheinander abfolgende Drehungen um die 3 Winkel die in a) rot dargestellte Materialorientierung aus dem Ursprungszustand erreicht wird.



**Bild 5:** Kristallorientierungswinkel

Der wichtigste Winkel ist dabei  $\theta$ , da er die Auslenkung des Einkristalls aus der radialen (Vorzugs-)Richtung und damit aus der Hauptbelastungsrichtung beschreibt.

Sämtliche ausgewählten Systemparameter haben einen mehr oder minder großen Einfluss auf die als Zielgröße definierte Gesamtlebensdauer der Turbinenschaufel. Zur Realisierung der Zufallszahlen und Durchführung der MCS wurde die an der TU Dresden entwickelte Software ProSi ([1], [2]) verwendet. Der Programmablauf gestaltet sich wie in Bild 6 dargestellt:



**Bild 6:** Programablauf zur probabilistischen Analyse

ProSi läuft wie aus **Bild 6** ersichtlich als Rahmenprogramm der MCS. Die von ProSi generierten Orientierungswinkel müssen im nächsten Schritt von einem in der Programmiersprache C geschriebenen Unterprogramm über Winkelbeziehungen zu Koordinaten umgewandelt werden, mit denen Abaqus die Materialorientierung eindeutig zuordnen kann. Diese Koordinaten werden dann im Abaqus Inputfile abgelegt. Gleiches gilt für die Variation der Position der Lasteinleitung. Die materialbedingte Streuung der Kriechigenschaften wird direkt in der Kriechsubroutine berücksichtigt, die dem Abaqus-Analyseprozess in Form einer User-Subroutine bereitsteht. Nach erfolgreicher FE-Analyse wird mit einem für Abaqus CAE geschriebenen Pythonscript die LCF-, Kriech- und kombinierte Gesamtlebensdauer ausgewertet. Diese Schritte werden

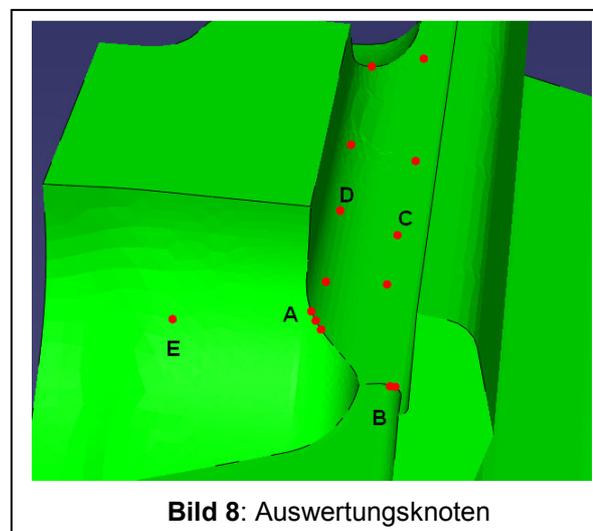
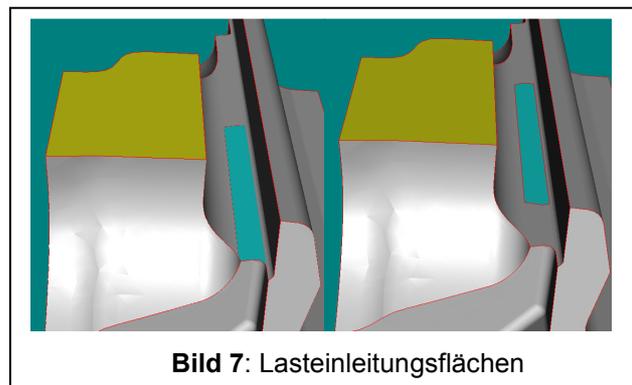
für jede einzelne FE-Analyse automatisch durchgeführt. Abschließend werden vordefinierte Ergebnisgrößen wie Lebensdauern oder Spannungen an bestimmten Punkten im Modell aus allen Einzelrechnungen gesammelt und zusammen gegenüber den gestreuten Eingangsparametern in ProSi Post dargestellt. Damit lassen sich die die Lebensdauer bestimmenden Systemparameter identifizieren und dessen Einfluß quantifizieren.

## Ergebnisse

Da die probabilistischen Untersuchungen in dem geplanten vollen Umfang derzeit noch nicht abgeschlossen sind, können erst vorläufige Ergebnisse präsentiert und erste Tendenzen abgeleitet werden. Die bedeutet insbesondere, dass zum derzeitigen Zeitpunkt vorerst nur eine relativ kleine Anzahl von FE-Analysen zur Auswertung zur Verfügung steht.

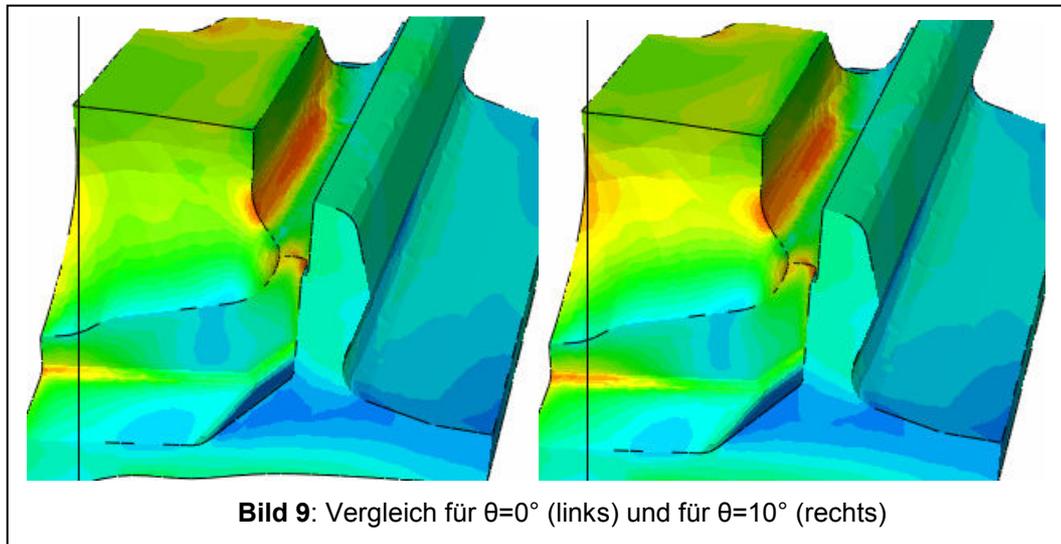
Die dabei durchgeführten Rechnungen beinhalten Variationen der drei Materialorientierungswinkel  $\alpha$ ,  $\theta$  und  $\rho$ .  $\theta$  als der interessanteste Winkel wurde dabei um  $0^\circ$ ,  $5^\circ$  und  $10^\circ$  ausgelenkt und die beiden verbliebenen um  $0^\circ$  und  $45^\circ$ . Diese Winkelvariationen liegen durchaus im Rahmen der üblichen Herstellungstoleranzen für das betrachtete Material (CMSX-4).

Daraus ergeben sich 12 mögliche Kombinationen. Außerdem wurden bisher zwei Positionen der Lasteinleitungsfläche untersucht. Zum einen bis direkt an die vordere Kante (**Bild 7** links, türkisfarbene Fläche) und zum anderen eine etwas nach innen verschobene, mittig in der Nut liegende Lastfläche (**Bild 7** rechts). Das verdoppelt die Anzahl der Analysen auf 24. Deren Auswirkungen auf die Lebensdauer sollen im folgenden erläutert werden.



Betrachtet man die Verteilung der Lebensdauer über das gesamte Submodell, so ergeben sich Ergebnisplots wie in **Bild 9** dargestellt. Die exakte in Flugzyklen vorhergesagte Lebensdauer ist aus nachvollziehbaren Gründen hier nicht angegeben, wobei die qualitative Veränderung der Lebensdauer das eigentliche Objekt der vorliegenden Untersuchung ist und die exakte quantitative Angabe dabei nicht entscheidend ist. Rot dargestellt sind Bereiche niedrigerer Lebensdauer wohingegen blaue Bereiche hohe Lebensdauern zu erwarten haben. Die Farbskalierung ist außerdem logarithmisch dargestellt, sodass Bereiche geringer Lebensdauer einfacher und bes-

ser visualisiert werden können. Die Skalierung ist für alle Bilder identisch, sodass gleiche Farben auch gleiche Werte repräsentieren. Außerdem wurden Auswertungen der Lebensdauerdaten an ausgewählten Knoten, die in **Bild 8** dargestellt sind, durchgeführt.

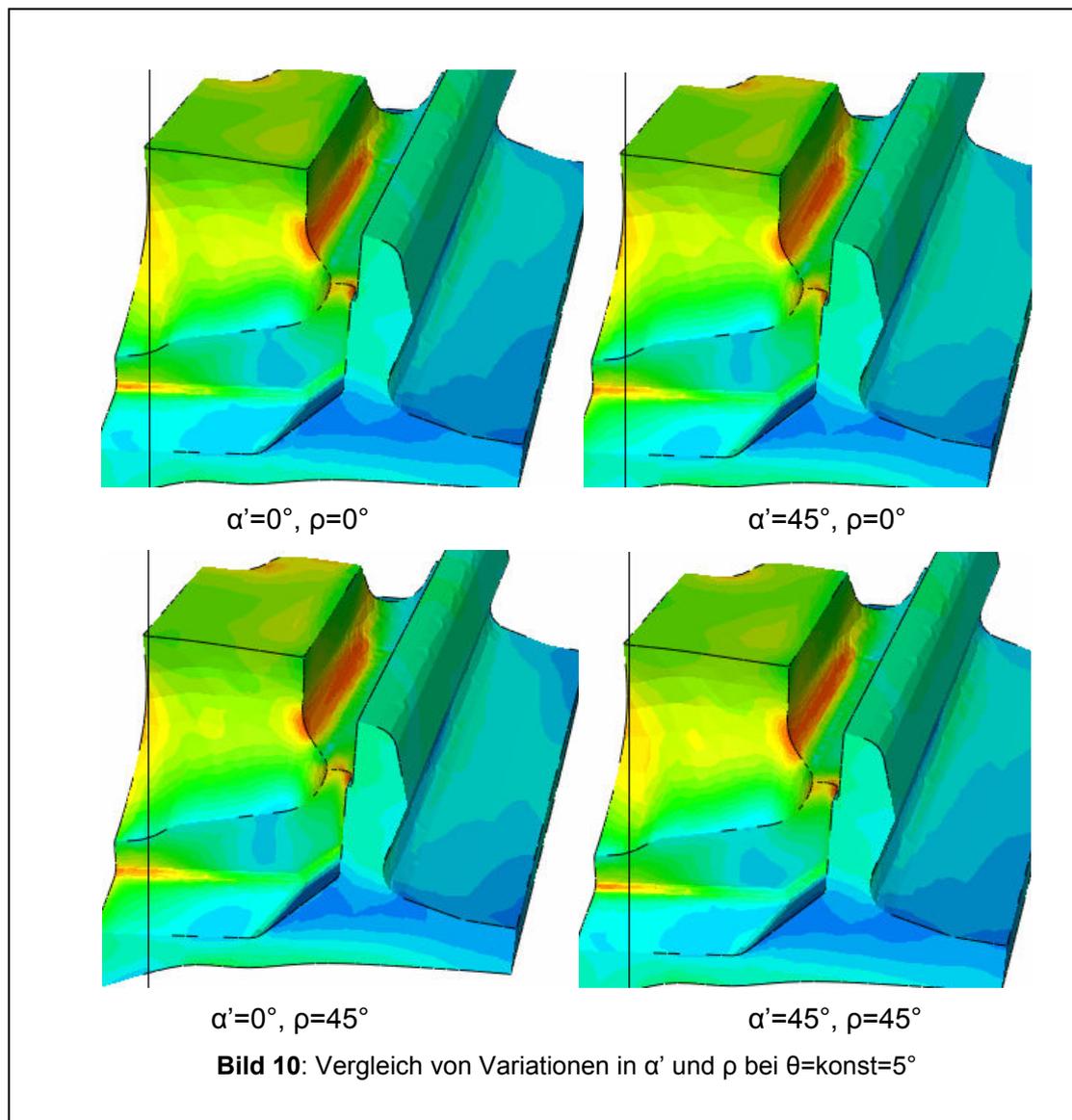


**Bild 9:** Vergleich für  $\theta=0^\circ$  (links) und für  $\theta=10^\circ$  (rechts)

**Bild 9** vergleicht die Lebensdauerverteilung für eine konstante Position der Lasteinleitungsfläche und konstante Orientierungswinkel  $\alpha'$  und  $\rho$ .  $\theta$  hat im linken Bild den Wert  $0^\circ$  und im rechten  $10^\circ$ . Diese Veränderung allein bewirkt eine Veränderung der Lebensdauerverteilung im analysierten Schaufelbereich. Betrachtet man spezielle Lebensdauererwartungen in ausgewählten Knoten, so ergeben sich recht substantielle Unterschiede. Beispielweise wandern die Orte der globalen Minima der Lebensdauer innerhalb der Modelle. Für  $\theta=0^\circ$  im linken Bild ist das erwartete Minimum der Lebensdauer im Bereich D (siehe **Bild 8**), also im mittleren Bereich des Ausrundungsradius der Nut. Für  $\theta=10^\circ$  liegt die minimal erwartete Lebensdauer dagegen im Bereich A. Betrachtet die Werte für vorhergesagten Lebensdauern, so erhöht sich die minimal erwartete Lebensdauer im Bauteil um mehr als 10% bei einer Erhöhung des Kippwinkels  $\theta$  um lediglich  $10^\circ$ .

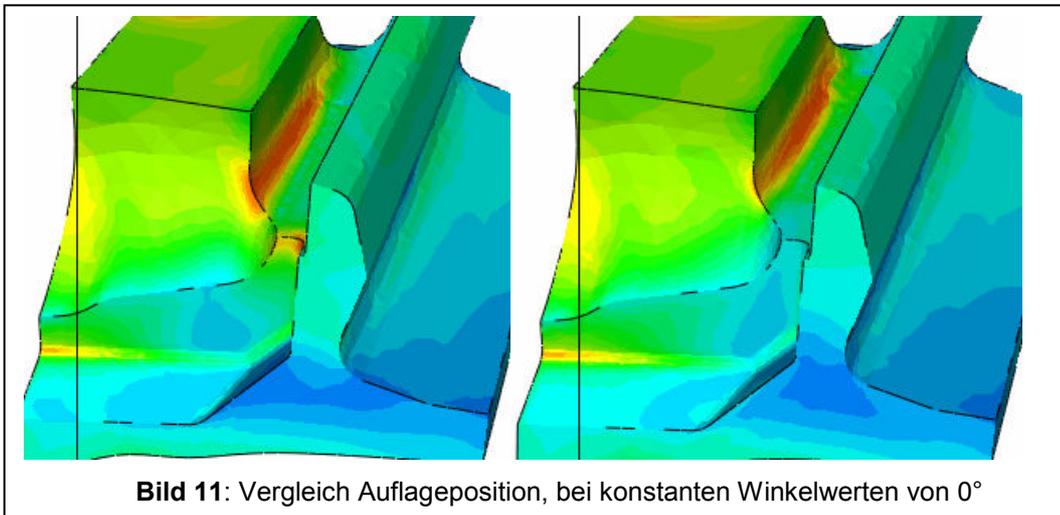
Interessant ist auch die Untersuchung gleicher Auslenkungswinkel  $\theta$  bei variabler Ausrichtung des Einkristalls um die Hauptorientierungsachse. Dazu gibt es in der bisherigen Analyse für jeden Auslenkungswinkel  $\theta$  vier weitere Rotationszustände. Im Falle von  $\theta=0^\circ$ , sind es allerdings nur zwei unterschiedliche Zustände, da eine Rotation von  $45^\circ$  um  $\alpha'$  und eine zusätzliche Rotation von  $45^\circ$  um  $\rho$  eine Gesamtrota-tion von  $90^\circ$  um die Hauptachse bewirkt, wodurch sich der Kristall aufgrund seiner iso-orthotropen Eigenschaften wieder in seiner Ausgangsrichtung befindet. Ebenso ist auch die einzelne Rotation um  $\alpha'=45^\circ$  identisch zu  $\rho=45^\circ$  sofern die übrigen Winkel konstant bleiben. Daher ist der Einfluss der Rotation um die Hauptachse im folgenden exemplarisch für  $\theta=5^\circ$  dargestellt.

Alle Darstellungen in **Bild 10** beziehen sich auf einen durchweg konstanten Winkel  $\theta=5^\circ$ . Das Bild links oben bezieht sich auf die Winkelwerte  $\alpha'=0^\circ$  und  $\rho=0^\circ$ . Rechts befindet sich eine Darstellung mit  $\alpha'=45^\circ$  und den unveränderten beiden anderen Winkeln ( $\theta=5^\circ$ ,  $\rho=0^\circ$ ). Links unten wurde  $\rho=45^\circ$  gesetzt bei den beiden ursprünglichen anderen Winkeln ( $\theta=5^\circ$ ,  $\alpha'=0^\circ$ ). Unten rechts sind sowohl  $\alpha'=45^\circ$  als auch  $\rho=45^\circ$  gesetzt worden, wieder bei konstant bleibendem Winkel für  $\theta$  von  $5^\circ$ . Deutlich wird, dass selbst bei konstantem Auslenkungswinkel  $\theta$ , die alleinige Drehung des Einkristalls um seine Hauptorientierungsachse einen deutlichen Einfluss auf die Lebens-



dauererwartung und –verteilung innerhalb des Submodells hat. Betrachtet man die Werte der vorhergesagten Lebensdauer, so ergeben sich Unterschiede von insgesamt bis zu 8% niedrigerer Lebensdauer im Bereich der kleinsten vorhergesagten Lebensdauer im Bereich A der Kante der Rundung am Ende der Auflagefläche.

Wie bereits beschrieben wurde auch der Einfluss der Position der Lasteinleitungsfläche in zwei verschiedenen Positionen ausgewertet (vgl. **Bild 7**). Auch hier lassen sich starke Unterschiede in der vorhergesagten Lebensdauer in Verbindung mit den Positionen der geringsten Lebensdauer nachweisen. **Bild 11** stellt dazu den Nominalfall links mit Kräfteinleitung direkt im vorderen Bereich dar, wobei rechts die Lasteinleitung wie in **Bild 7** nach hinten verlagert wurde. Sämtliche drei Materialorientierungswinkel sind konstant bei  $0^\circ$ . Die geringste Lebensdauer befindet sich für beide Fälle im Bereich D, also im Ausrundungsradius im mittleren Bereich der Nut (vgl. **Bild 8**). Allerdings ist die vorhergesagte Lebensdauer um ca. 5% gesunken, verschiebt man die Lasteinleitung innerhalb der Nut nach hinten. Positiv fällt allerdings auf, dass beim Verschieben der Lasteinleitungsfläche nach innen die zu erwartende Lebensdauer im vormals ebenfalls kritischen Bereich B deutlich gestiegen ist. Dies war zu erwarten, da die Kante nunmehr nicht Teil der Lasteinleitungsfläche ist.



### Schlussfolgerung und Ausblick

Die Ergebnisse der einzelnen Analysen zeigen, dass die Orientierung des Einkristalls einen entscheidenden Einfluss auf die zu erwartende Lebensdauer einer Turbinenschaufel hat. Außerdem beeinflusst die Position der Lasteinleitung nicht minder stark die Lebensdauer des betrachteten Bauteils. Daraus lässt sich die Notwendigkeit ableiten, im Zuge der Auslegung von Turbinenbauteilen nicht nur Nominalfälle mit idealisiert ausgerichteten Einkristallen zu analysieren, sondern auch Methoden zu verwenden, um den Einfluß von Streuungen wichtiger Systemparameter zu untersuchen. Hierfür bietet sich die MCS-Methode an, da mit ihr große Anzahlen zufälliger Kombinationen der Streugrößen abgedeckt werden können und somit zuverlässigere Aussagen über die Versagenswahrscheinlichkeit und damit die wahrscheinliche Lebensdauer eines Bauteils getroffen werden können. Es ist geplant, die MCS-Simulation über die gesamte Bandbreite der variierten Systemparameter systematisch auszudehnen und insbesondere auch den Einfluß der Streuung von Materialfestigkeitswerten in die probabilistische Gesamtanalyse mit einzubeziehen.

## Danksagung

Die präsentierten Ergebnisse dieses Beitrags wurden teilweise im Rahmen des Förderprojektes AG Turbo III/COOREFF unter der Förderkennnummer FKZ 0327723B (Verbundvorhaben COREFF-T, Vorhabensgruppe ‚Lebensdauer von Turbinenkomponenten‘) erstellt.

## Referenzen

- [1] Voigt, Matthias; Mücke, Roland; Vogeler, Konrad und Oevermann, Michael: *Probabilistic Lifetime Analysis for Turbine Blades based on a Combined Direct Monte Carlo and Response Surface Approach*, Proc. Of ASME Turbo Expo 2004, June 14-17, 2004, Vienna, Austria.
- [2] Voigt, Matthias; Schlums, Hartmut; Mücke, Roland und Vogeler, Konrad: *Probabilistische Analyse von Turbinenschaufeln unter Berücksichtigung vno Geometrieänderungen*, Deutscher Luft- und Raumfahrtkongreß, 20. – 23. September 2004, Dresden.
- [3] Wintrich, Klaus: *Schädigungsverhalten der einkristallinen Superlegierung CMSX-4 bei Hochtemperaturbelastung*, Technische Universität Darmstadt, Dissertation, 2004.
- [4] Williams, Steve J.: *An Automatic Technique for the Analysis of Creep Strain Data*, Rolls-Royce-interner Bericht, MFR30018, 1994.
- [5] Webster, Paul: *Use of the New Lifting Correlation methodology for critical rotating parts*, Rolls-Royce-interner Bericht, DNS99641, 2004.