



Statistischer Ansatz zur Berücksichtigung von Fertigungstoleranzen in der Axialspaltauslegung von Turboverdichtern

S. Weihard, A. Hupfer, H.-P. Kau
Technische Universität München, Lehrstuhl für Flugantriebe



Agenda

Einleitung

Motivation

Statistischer Ansatz

Montageprozesse

3D-Effekte am statorseitigen Spaltufer

Spaltanalyse – test case

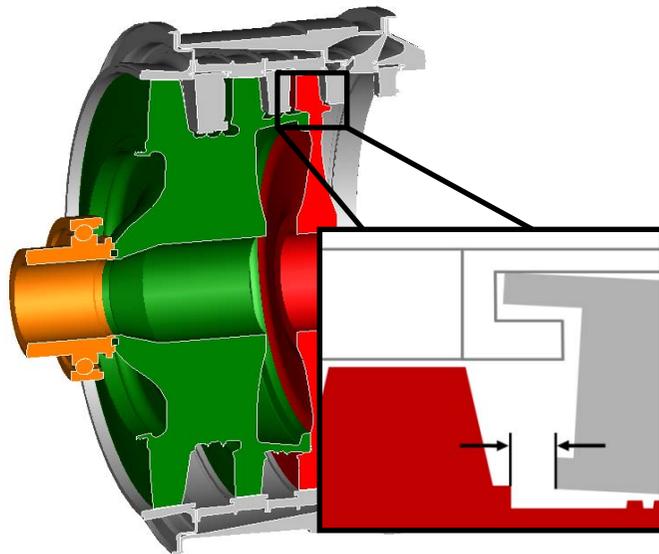
Spaltermittlung – Betrachtungsweisen

Minimalspalt im Schaufelkranz

Minimalspalt – Konsequenz für die Spaltauslegung

Zusammenfassung

Motivation – Statistik in der Spaltauslegung

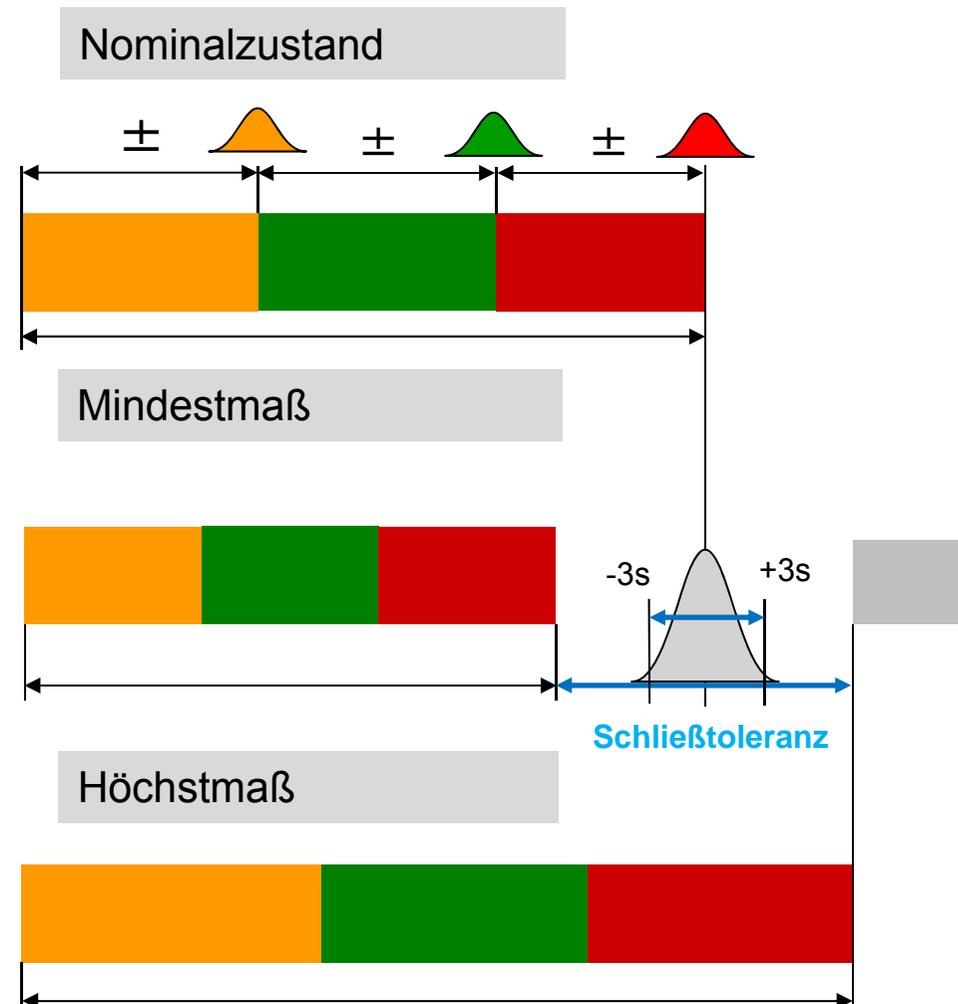


statistische Schließtoleranz
(wahrscheinlichkeitsbasiert)



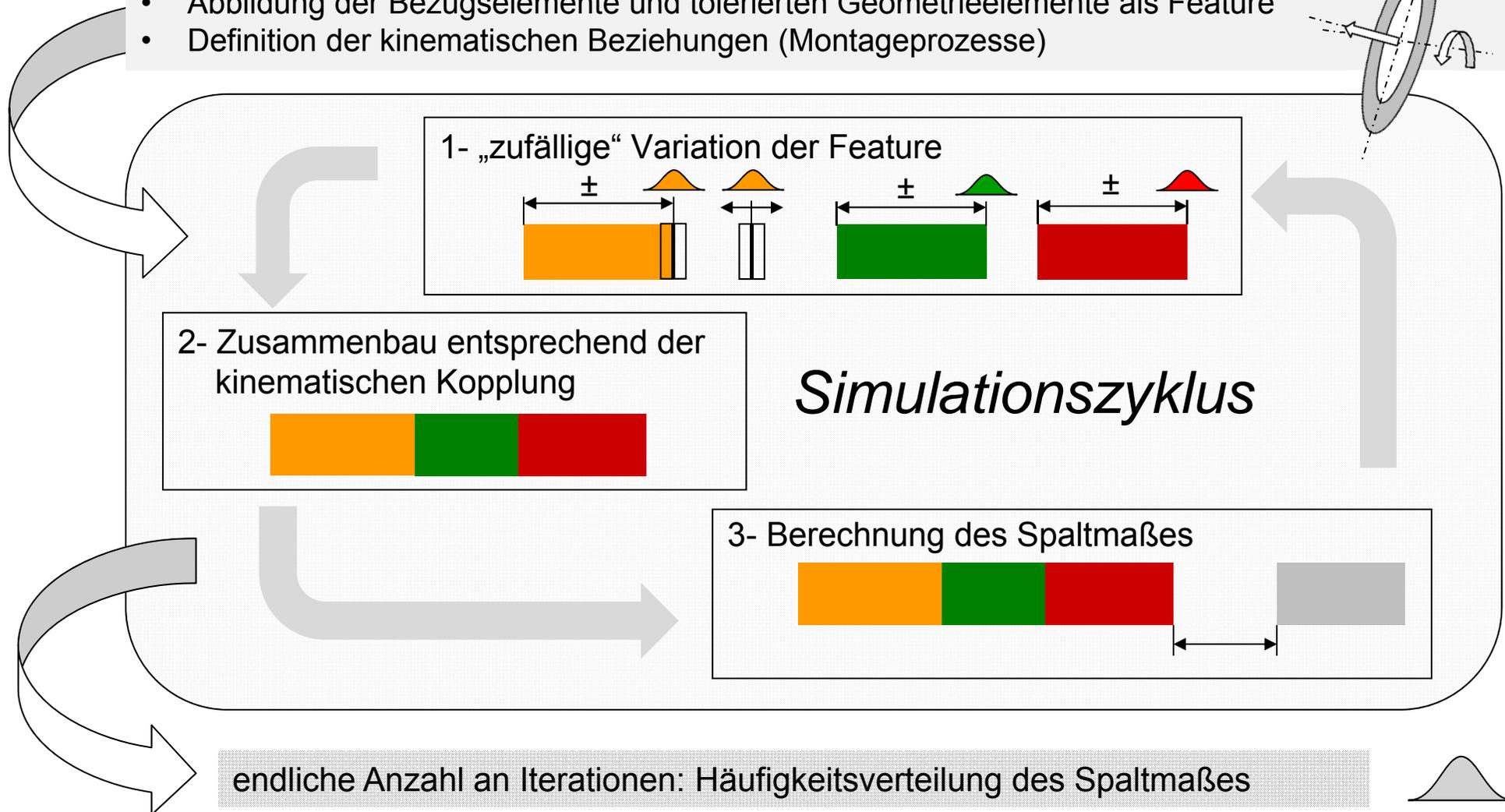
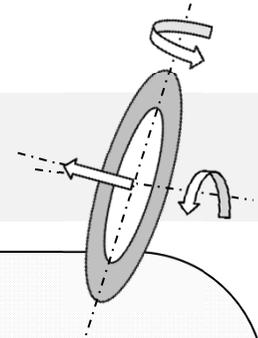
arithmetische Schließtoleranz
(theoretischer Grenzfall)

- engere Dimensionierung von Spalten in Turbomaschinen!
- Toleranzaufweitungen!



Statistischer Ansatz – featurebasierte Toleranzanalyse

- Abbildung der Bezugselemente und tolerierten Geometrieelemente als Feature
- Definition der kinematischen Beziehungen (Montageprozesse)





Agenda

Einleitung

Motivation

Statistischer Ansatz

Montageprozesse

3D-Effekte am statorseitigen Spaltufer

Spaltanalyse – test case

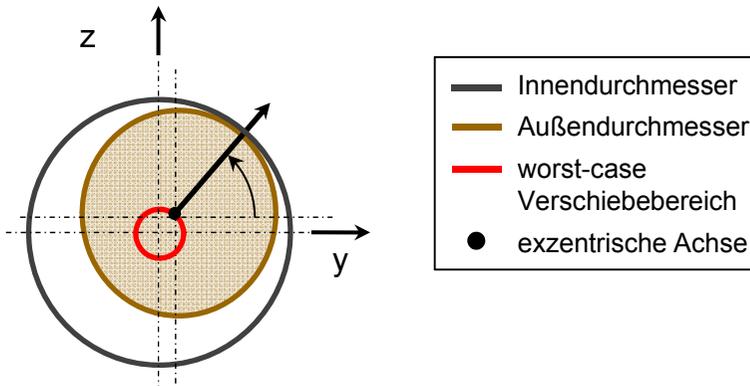
Spaltermittlung – Betrachtungsweisen

Minimalspalt im Schaufelkranz

Minimalspalt – Konsequenz für die Spaltauslegung

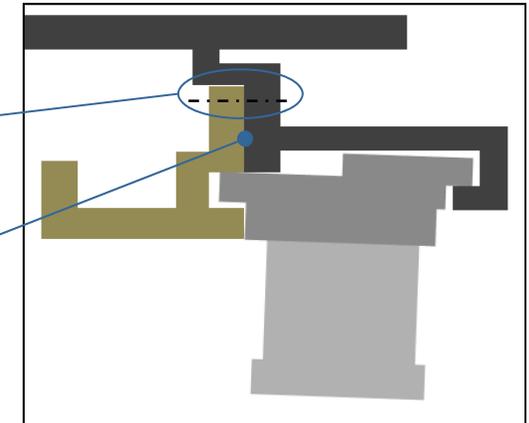
Zusammenfassung

Ringgehäuseelemente – Modellierung des Spiels

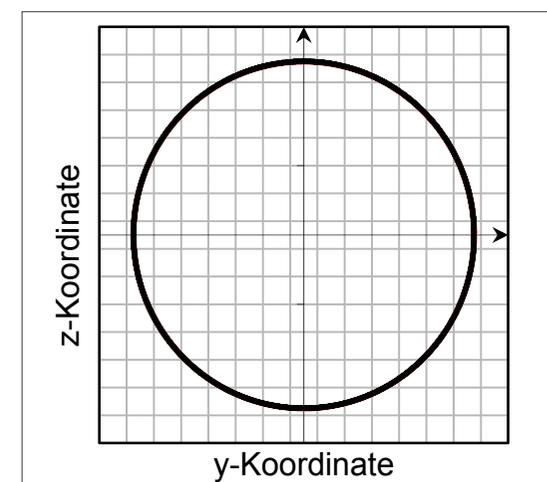
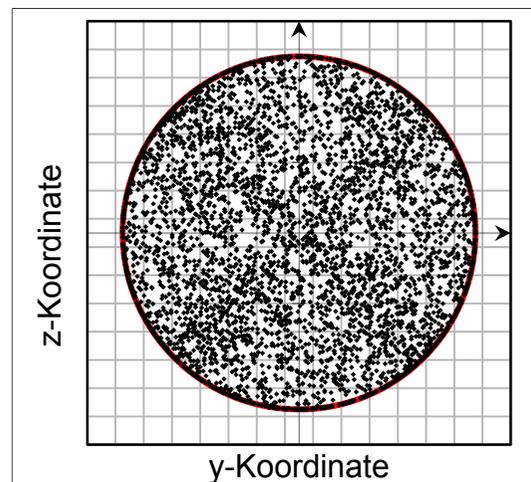
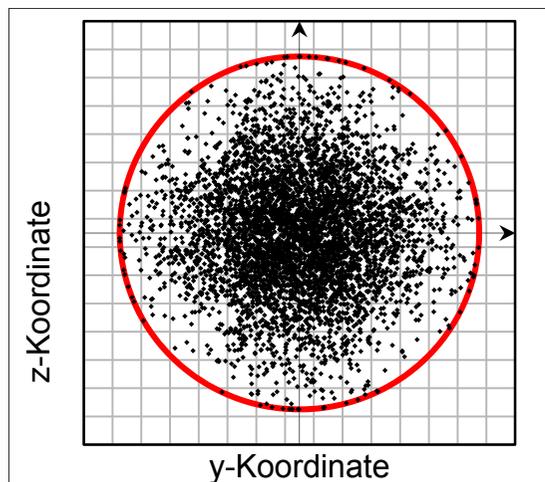


Zentrierung

Flanschflächen



- 2D-Betrachtung ohne Toleranzeinfluss (konstantes Spiel)
- Normalverteilung
 - Ausrichtung
- Gleichverteilung
 - zufällige Montage
- statistische Kraftwirkung
 - Krafteinfluss

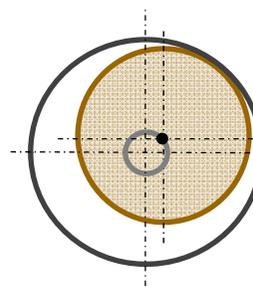


Ringgehäuseelemente – Modellierung des Spiels

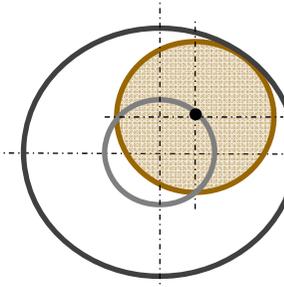
Exzentrizität infolge variablen Spiels

- 2D-Betrachtung mit Toleranzeinfluss
- Verschieberegion abhängig von Durchmesservariationen (normalverteilt)
 - Spiel vorhanden (variabel) / kein Spiel

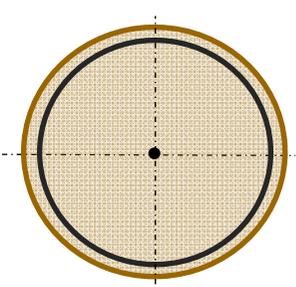
Simulationsschritt x



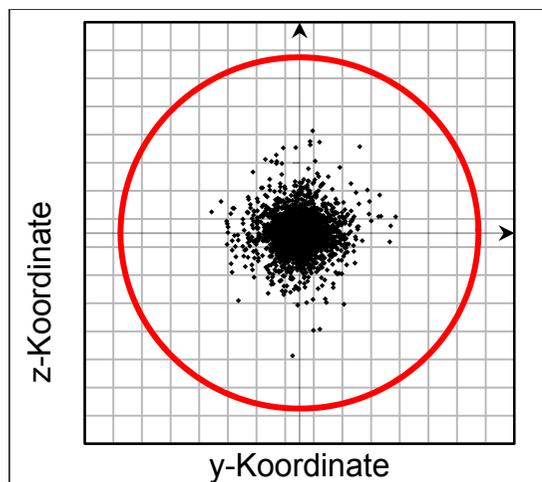
x+1



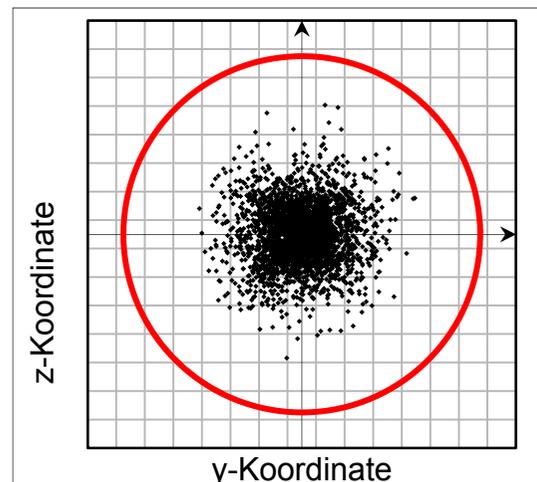
x+2



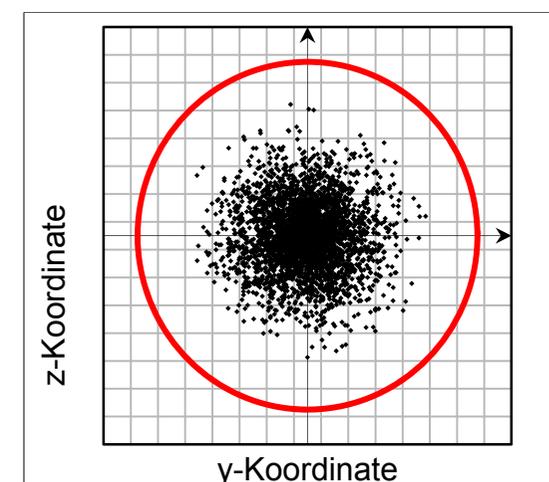
- Normalverteilung
 - Ausrichtung



- Gleichverteilung
 - zufällige Montage



- statistische Kraftwirkung
 - Krafteinfluss





Agenda

Einleitung

Motivation

Statistischer Ansatz

Montageprozesse

3D-Effekte am statorseitigen Spaltufer

Spaltanalyse – test case

Spaltermittlung – Betrachtungsweisen

Minimalspalt im Schaufelkranz

Minimalspalt – Konsequenz für die Spaltauslegung

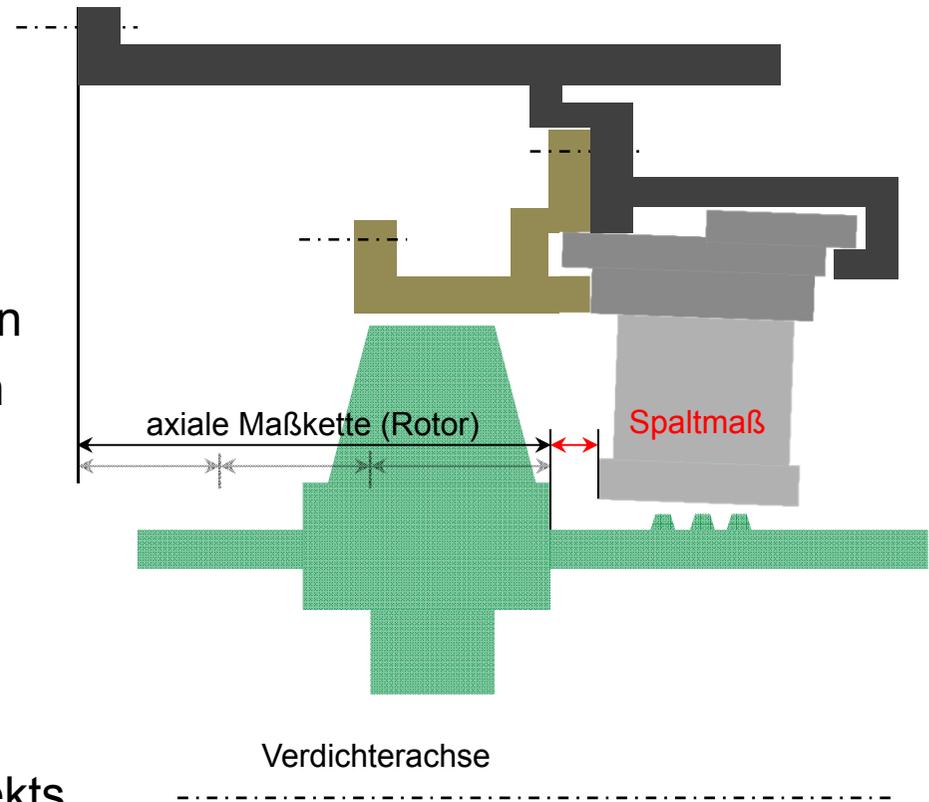
Zusammenfassung

Spaltanalyse - test case

- 1D-Variation des Rotorspaltufers in Verdichter-Achsenrichtung
 - Maßtoleranzen

- 3D-Implementierung der Stator-Toleranzen
 - Rundlauf- und Durchmesser-toleranzen
 - Maß- und Parallelitätstoleranzen
 - ...

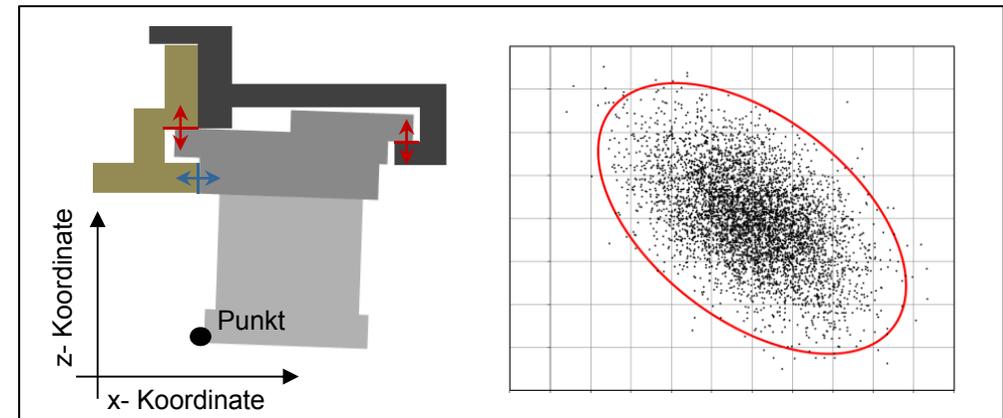
- Spaltanalyse zwischen Rotornabe und Leitgitter (Innendeckband)
 - Betrachtung des statorseitigen 3D-Effekts



Spaltermittlung - Betrachtungsweisen

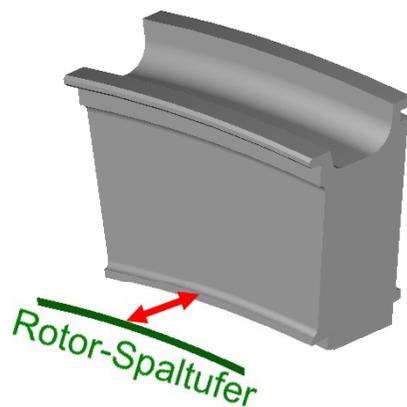
Punktvariation am Leitschaufel-Spaltufer

- Korrelationskoeffizient $\neq 0$
 - Abhängigkeit
- Verkippungseffekte
 - geneigte Kovarianzellipse

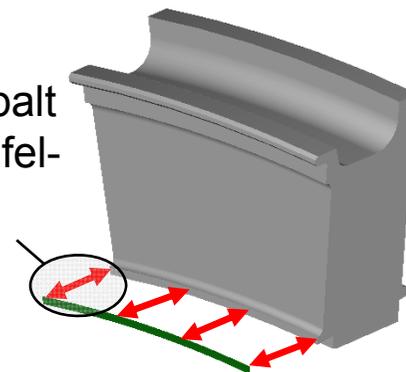


Spaltermittlung

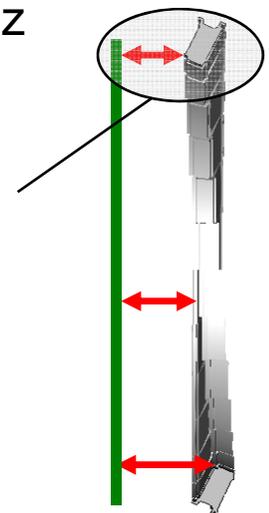
- Einfluss auf statistische Kenngrößen
 - Punktbetrachtung
 - Leitschaufelsegment
 - Schaufelkranz



Minimalspalt
Leitschaufel-
segment

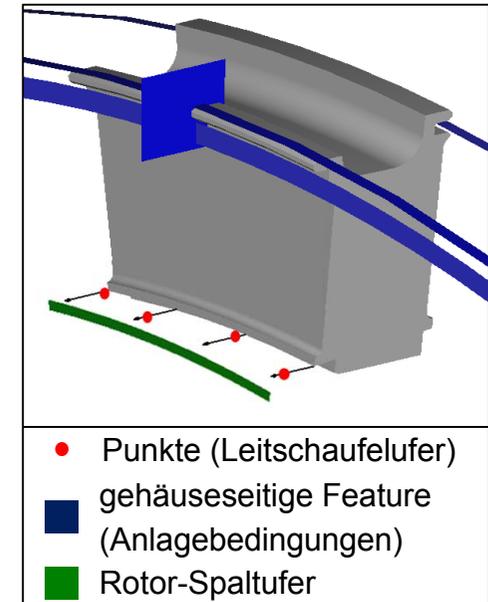


Minimalspalt
Schaufelkranz

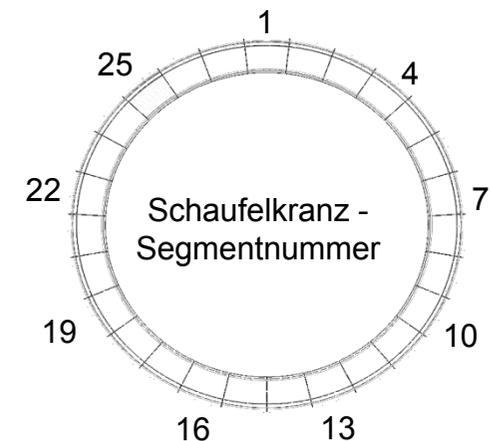
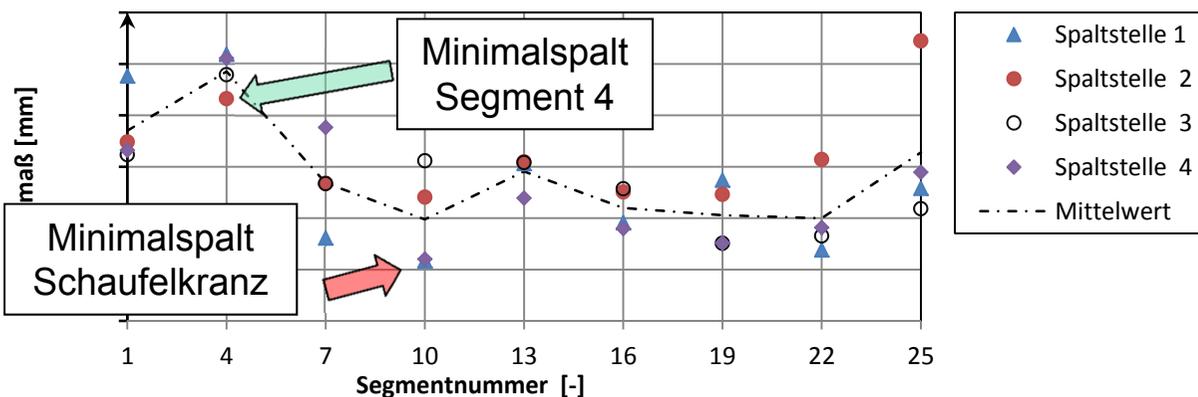


Minimalspalte im Schaufelkranz

- Variationen am Leitschaufel-Spaltufer
 - unabhängige Variation mehrerer Punkte (Abstraktion abhängig vom Fertigungsverfahren!)
 - kinematisch abhängige Variationen (Montageprozess Leitschaufelsegment - Gehäuse)
- Berechnung mehrerer Spaltstellen
 - Minimalspalt eines Leitschaufelsegments

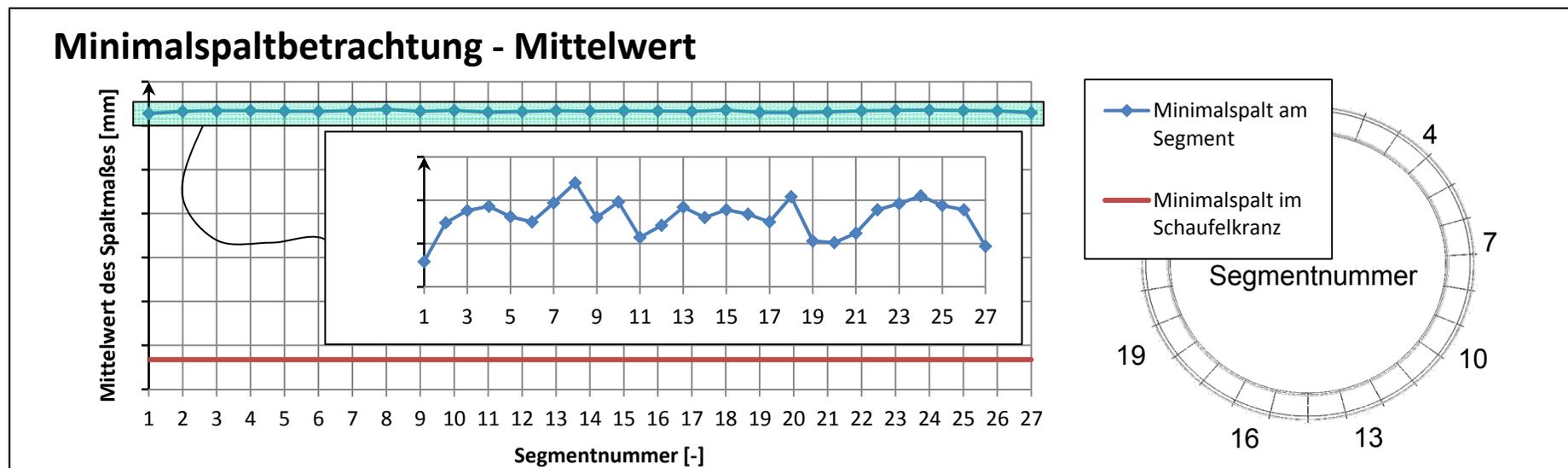


Spaltmaße im Schaufelkranz eines diskreten MCS-Schritts



Minimalspalte im Schaufelkranz

- Berechnung des Minimalspaltes zwischen Rotornabe und Leitschaufelsegment
 - theoretisch: identische statistische Kenngrößen aller Segmente
 - praktisch: geringfügige Differenzen durch Generierung unabhängiger Variationen
- Berechnung des Minimalspaltes im Schaufelkranz für jeden Simulationszyklus
 - Mittelwertverschiebung
 - (Verringerung der Standardabweichung)

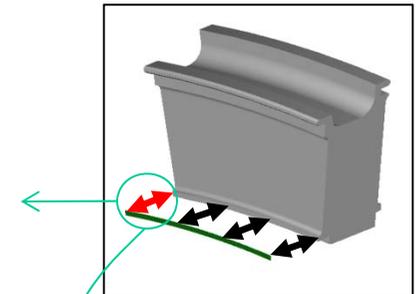


Minimalspalt – Konsequenz für die Spaltauslegung

Spaltanalyse entsprechend zwei Betrachtungsweisen

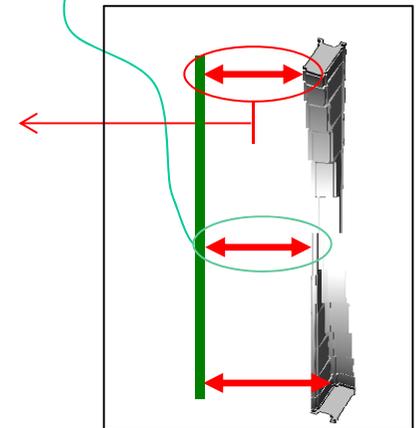
1) N-fache Minimalspaltberechnung Rotornabe/Leitschaufelsegment

- Ermittlung der statistischen Kenngrößen
- Normalverteilung: Standardabweichung s_{MS} , Mittelwert $x_{m MS}$



2) N-fache Minimalspaltberechnung im Schaufelkranz

- Ermittlung der statistischen Kenngrößen
- Normalverteilung: Standardabweichung s_{MK} , Mittelwert $x_{m MK}$



Definition einer Spaltmaß-Schließtoleranz

- LL/UL auf Basis der statistischen Kenngrößen entsprechend 1)
 - Vergleich Schließtoleranz/Häufigkeitsverteilung entsprechend 2)

Minimalspalt – Konsequenz für die Spaltauslegung

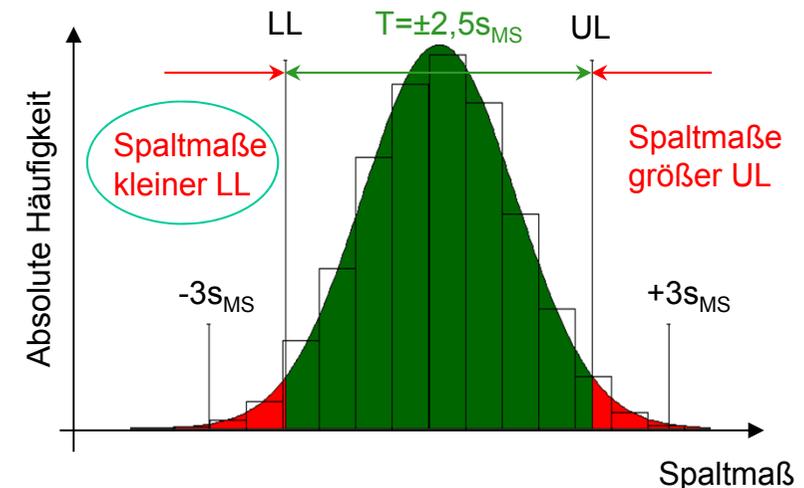
Vergleich

- Spaltauslegung entsprechend 1)
 - $UL = x_{m\ MS} + 2,5s_{MS}$
 - $LL = x_{m\ MS} - 2,5s_{MS}$
- Minimalspalt im Schaufelkranz nach 2)
 - Mittelwertverschiebung
 - Reduktion der Standardabweichung
 - Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Spaltmaßen kleiner LL steigt!
 - relevant für Auslegung gegen Spaltüberbrückung!

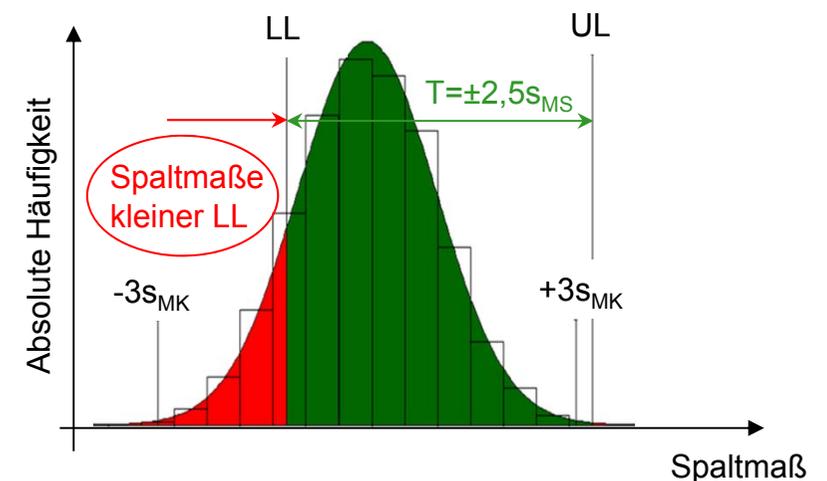
Einflussfaktoren

- Toleranzen
- Schaufelhöhe, Segmentwinkel
- ...

1) Häufigkeitsverteilung „Minimalspalt am Einzelcluster“



2) B: Häufigkeitsverteilung „Minimalspalt im Schaufelkranz“





Zusammenfassung

- statistische Toleranzanalyse ermöglicht Optimierung
 - Toleranzaufweitung: Reduzierung der Fertigungskosten
 - engere Dimensionierung der Spalte: Qualitätsoptimierung
- Abbildung der Montageprozesse ist wesentlich
 - wiederkehrende turbomaschinenspezifische Montageprozesse
 - Template-Anwendung von Simulationsmodellen
- statistischer Ansatz erfordert komplexeres Vorgehen
 - keine „versteckten Sicherheiten“
 - wahrscheinlichkeitsbasierte Festlegung von Spaltmaß-Schließtoleranzen



**VIELEN DANK FÜR IHRE
AUFMERKSAMKEIT!**



ANHANG



Nomenklatur

Abkürzungen

LL	unteres Grenzmaß
UL	oberes Grenzmaß
MCS	Monte-Carlo-Simulation

Formelzeichen

s	Standardabweichung
s_{MS}	Standardabweichung (Minimalspalt zwischen Rotornabe und Leitschaufelsegment)
s_{MK}	Standardabweichung (Minimalspalt zwischen Rotornabe und Leitschaufelkranz)
x_m	Mittelwert
$x_{m MS}$	Mittelwert (Minimalspalt zwischen Rotornabe und Leitschaufelsegment)
$x_{m MK}$	Mittelwert (Minimalspalt zwischen Rotornabe und Leitschaufelkranz)
T	Schließtoleranz
N	Anzahl Monte-Carlo-Simulationsschritte
x	diskreter Simulationsschritt

Indices

ik	Feature k auf Bauteil i
------	-----------------------------