

# Rotorblätter – leichter, präziser, kostengünstiger?!

Wissenschaftstag

Braunschweig, 20. September 2016

Birgit Wieland



Knowledge for Tomorrow



# Inhalt

- Einleitung
- Motivation
- Methode
- Toleranzoptimierte Fertigung
- Ausblick



## Einleitung

### Wie werden Rotorblätter leichter?

- Smart Blades
- optimiertes Design
- ...

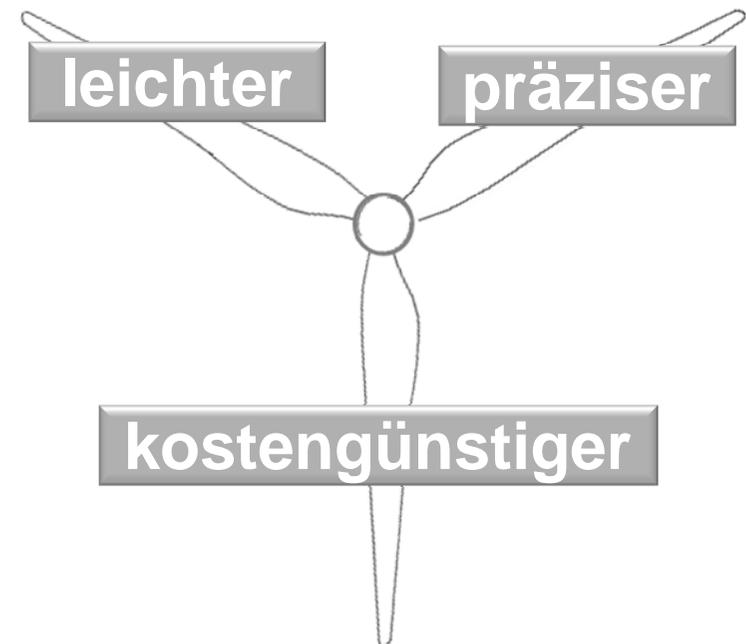
### Voraussetzungen

- Präzisere Faserablage
- geringere Streuung der Toleranzfelder

### Lösungsansätze:

- Automatisierung
- Qualitätssteigerung durch Verringerung der Toleranzspannen

## Leichter, präziser, kostengünstiger?



## Motivation

### Maximale Bauteilqualität bei minimal möglichen Kosten

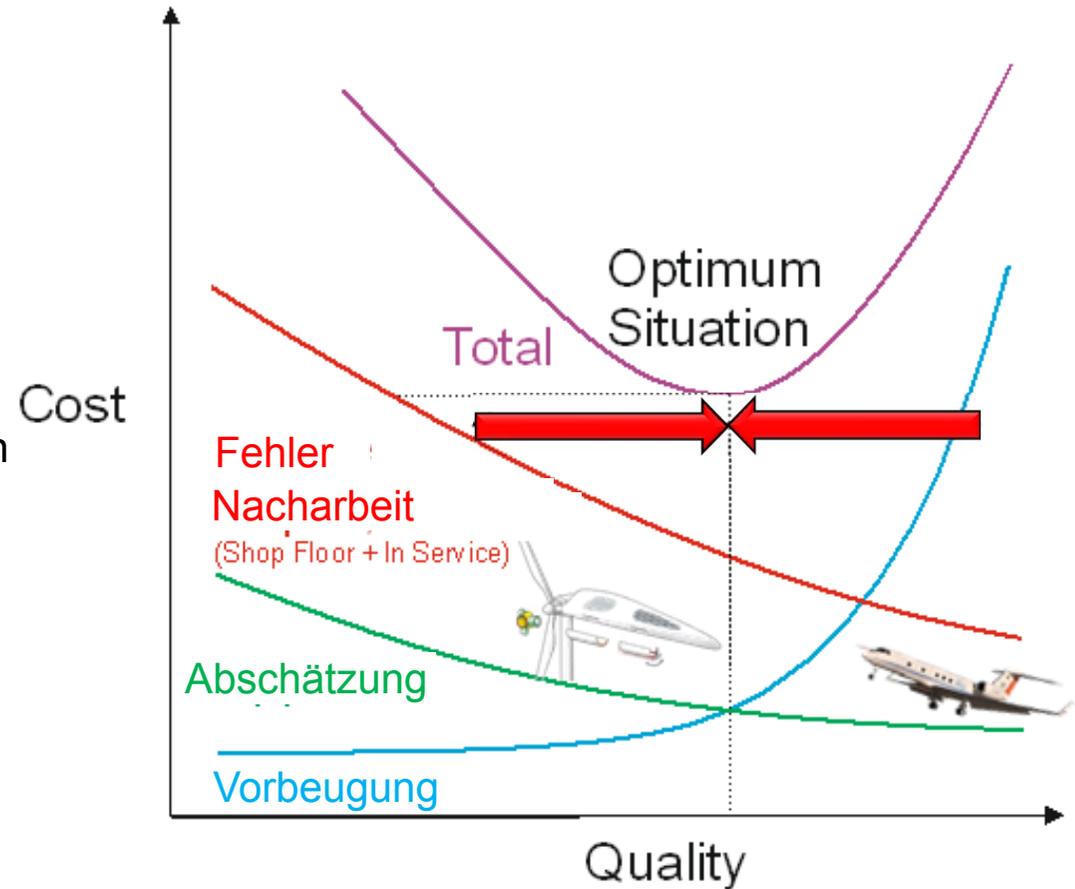
2 Wege:

Qualitätsoptimierte Fertigung

Kleine Toleranzfelder, hohe Kosten durch Minimierung des Einflusses der Störfaktoren  
⇒ Optimierte, teure Fertigung

Robuste Fertigung

Große Toleranzfelder, hohe Kosten durch Fehler und Nacharbeit  
⇒ robust, kostengünstige Fertigung



Schematische Darstellung: Verhältnis Produktionskosten zu Bauteilqualität



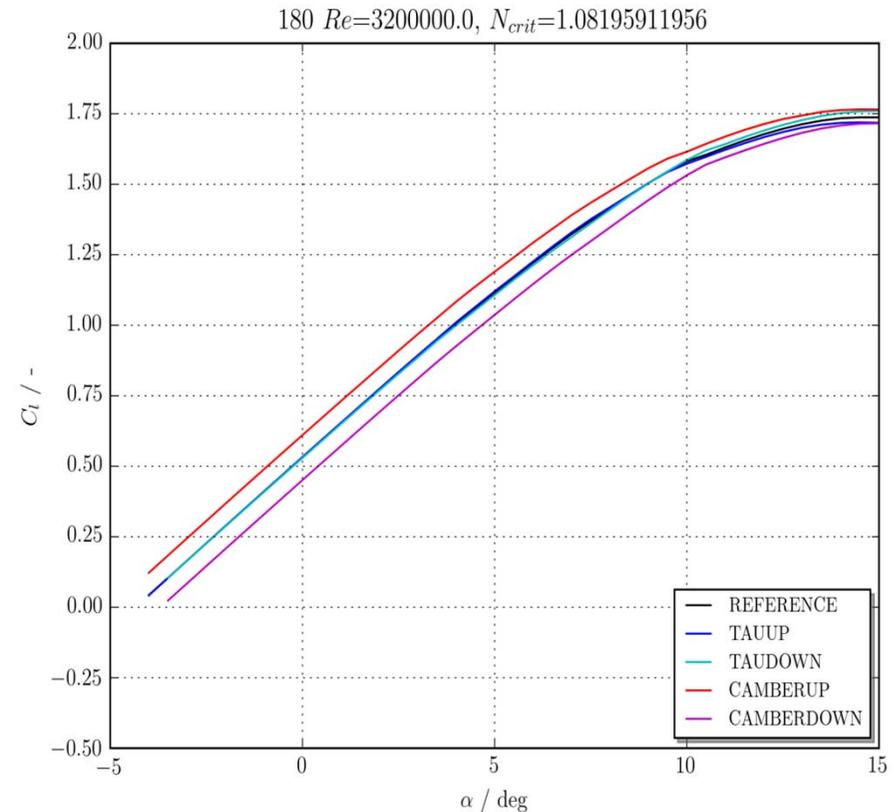
## Methode - Qualitätsoptimierte Fertigung

- Nachteile:
  - Hohe Kosten durch komplexe Werkzeuge und Einrichtungen (z. B. Autoklav)
  - Lange Produktionszyklen
- Enge Toleranzfelder nur durch Automatisierung und hohen Aufwand erreichbar
- Beispiel: Strukturelle Verklebung im Bereich UAV  
Klebspalt  $0,5^{+0,2}_{-0,2}$  mm



## Methode - Robuste Fertigung

- Nachteile:
  - Hoher Materialverbrauch durch hohe Sicherheitsfaktoren
  - Hoher Zeit- und Kostenaufwand durch Nacharbeit
  
- Leistungsverluste durch Abweichungen z.B. in Profilgeometrie
  
- Beispiel: Aerodynamische Änderungen durch Abweichung der Formgeometrie



**Auftriebsbeiwert für Unterschiedliche Abweichungen**  
Quelle IWES



## Methode – Toleranzoptimierte Fertigung

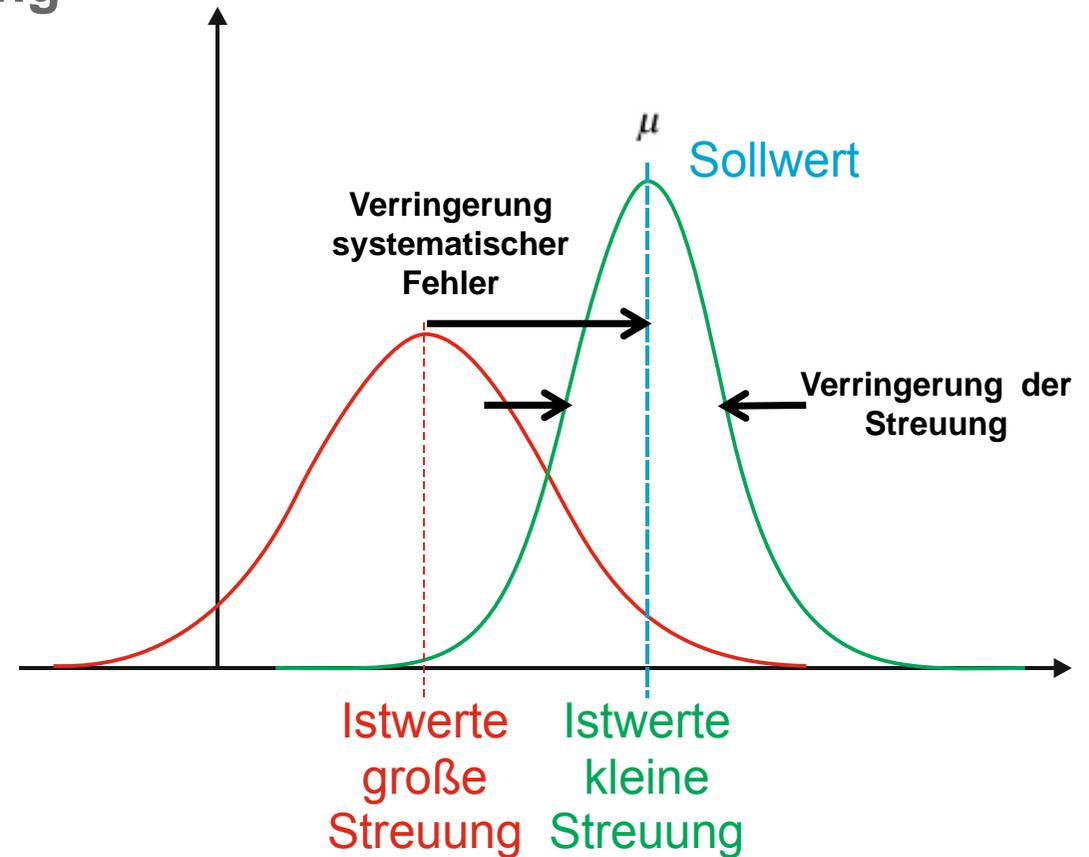
### Robuste Fertigung mit verbesserten Bauteileigenschaften

- Verringerung systematischer Fehler
- Verringerung der Streubreite

#### Durch:

- Automatisierung (nur wo notwendig und kostentechnisch sinnvoll)
- Sensorgestütztes Toleranzmanagement

### Herausforderung: Identifikation der kritischen Pfade



# Toleranzoptimierte Fertigung - Anwendung

## Rotorblätter für Windenergieanlagen:

### Abmaße:

- Länge >80m
- Max. Blatttiefe >5m

### Bestandteile

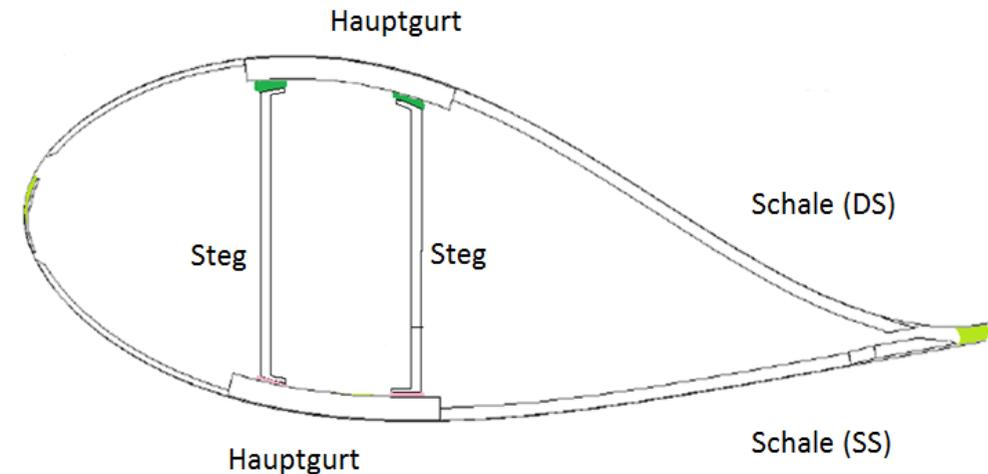
- Schalen (Sandwichmaterial)
- Hauptgurte (UD-Glas, UD- Kohle)
- Steg(e) (Sandwichmaterial)

### Herstellung:

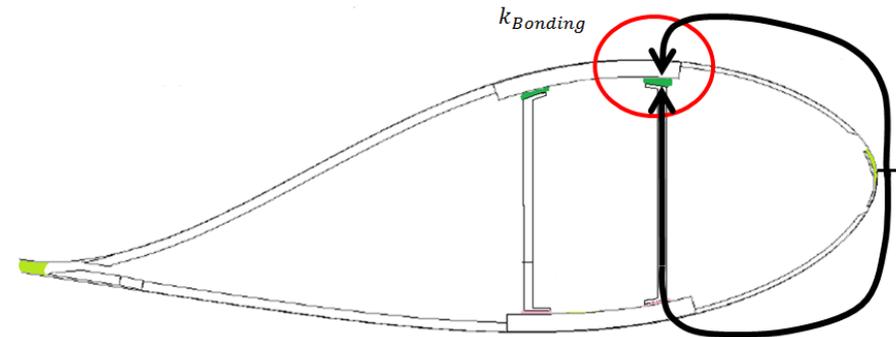
- Infusion
- Einseitig beheizbare Werkzeuge

### Verklebung eines Rotorblattes

**Schlüsselcharakteristik  $k= 1-15\text{mm}$**



Querschnitt eines Rotorblattes nach [2]



Toleranzkette und Schlüsselcharakteristik



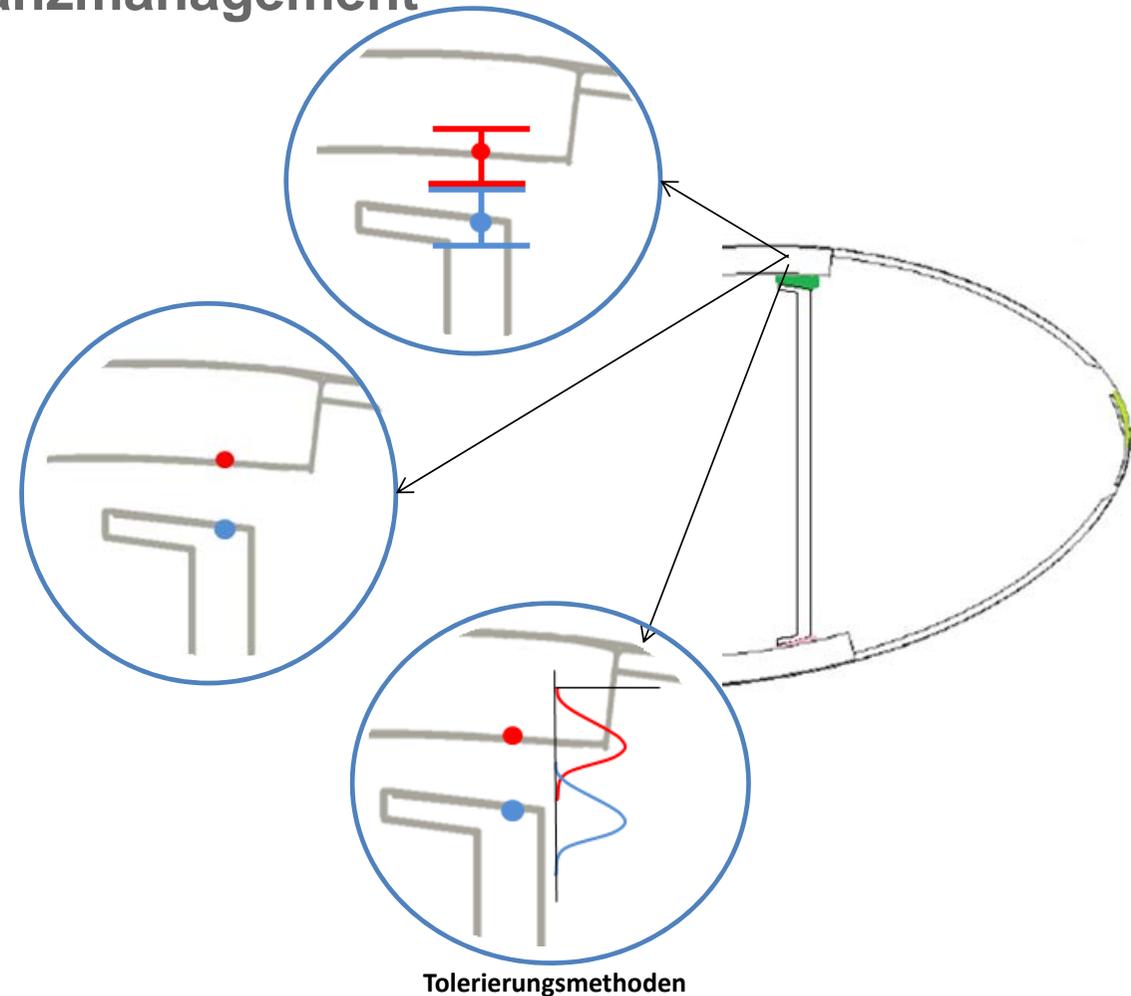
# Toleranzoptimierte Fertigung - Toleranzmanagement

## Toleranzmanagement:

- Identifikation der Schlüsselcharakteristik (Kerneigenschaft des Produktes)
- Identifikation der kritischen Parameter und Übertragungsfunktion
- Aufbau eines Toleranzanalyse systems zur Beschreibung des Einflusses der einzelnen Parameter auf die Schlüsselcharakteristik

## Tolerierungsmethoden

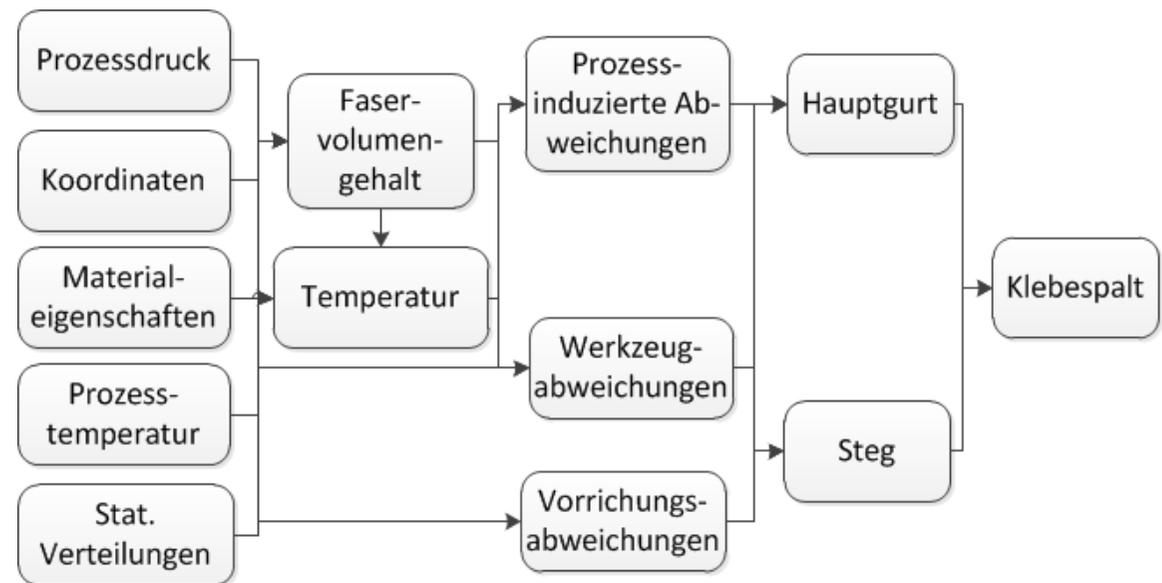
- Arithmetisch
- Zufällig
- Statistisch



# Toleranzoptimierte Fertigung - Toleranzanalyse

## Besonderheiten der Toleranzanalyse für FV-Bauteile

- Elemente der Toleranzkette:
  - Prozessparameter
- Übertragungsfunktionen
  - Chemische Prozesse
  - Physikalische Prozesse
- **Herausforderung:**
  - Hohe Streuung der Parameter und Materialeigenschaften
  - Prozessorientierte Übertragungsfunktionen



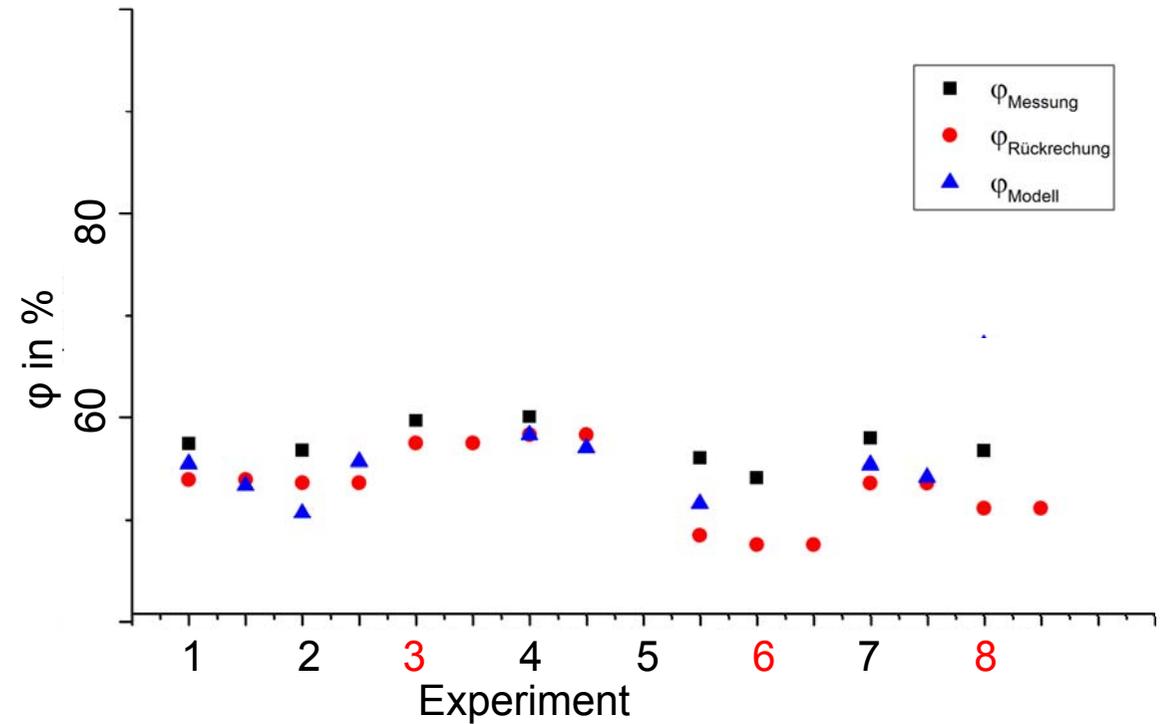
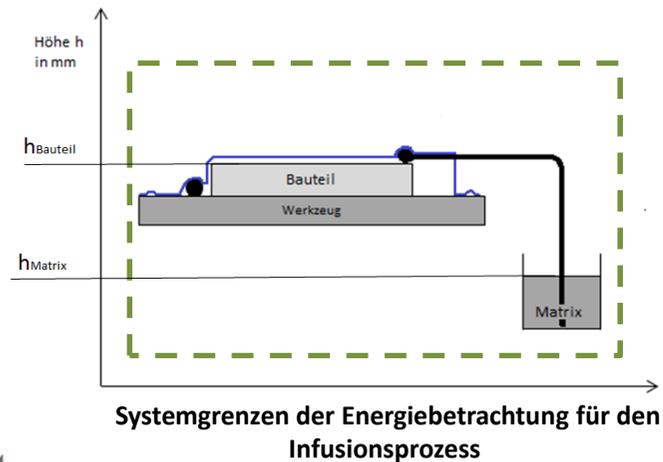
Module der Toleranzbetrachtung für den Klebespalt von RB



# Toleranzoptimierte Fertigung - Toleranzanalyse

## Modellierung des Faservolumengehaltes

- Infusion bei Umgebungsdruck
- Einseitiges Werkzeug
- Dicke Laminate
- Energiemodell mit Federanalogie



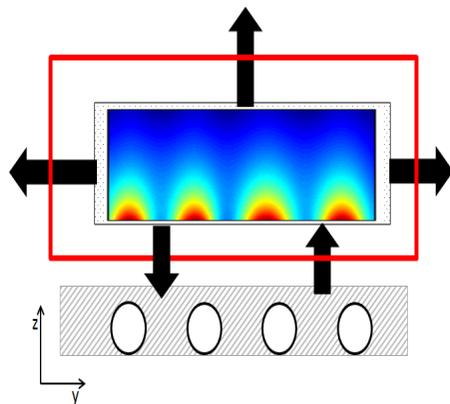
Faservolumengehalt aus Dickenmessung, Rückrechnung aus Plattengewicht und dem Modell



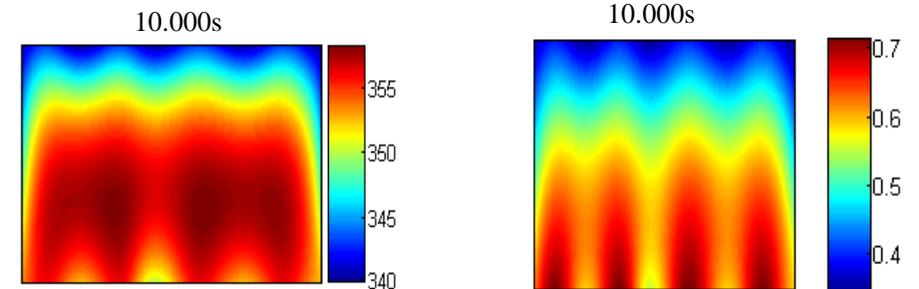
# Toleranzoptimierte Fertigung - Toleranzanalyse

## Modellierung der Prozesstemperatur

- Einseitig-beheizbare Werkzeuge
- Dicke Lamine
- Numerische Simulation auf Basis der Fourier'schen Wärmegleichung

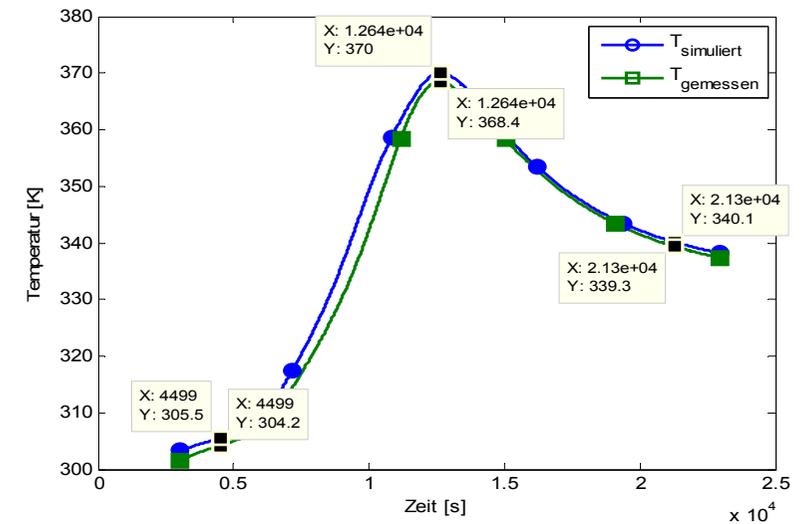


Modellierung Aushärtung Hauptgurt



Temperaturverteilung

Aushärtegradverteilung



Verifizierung des Modells

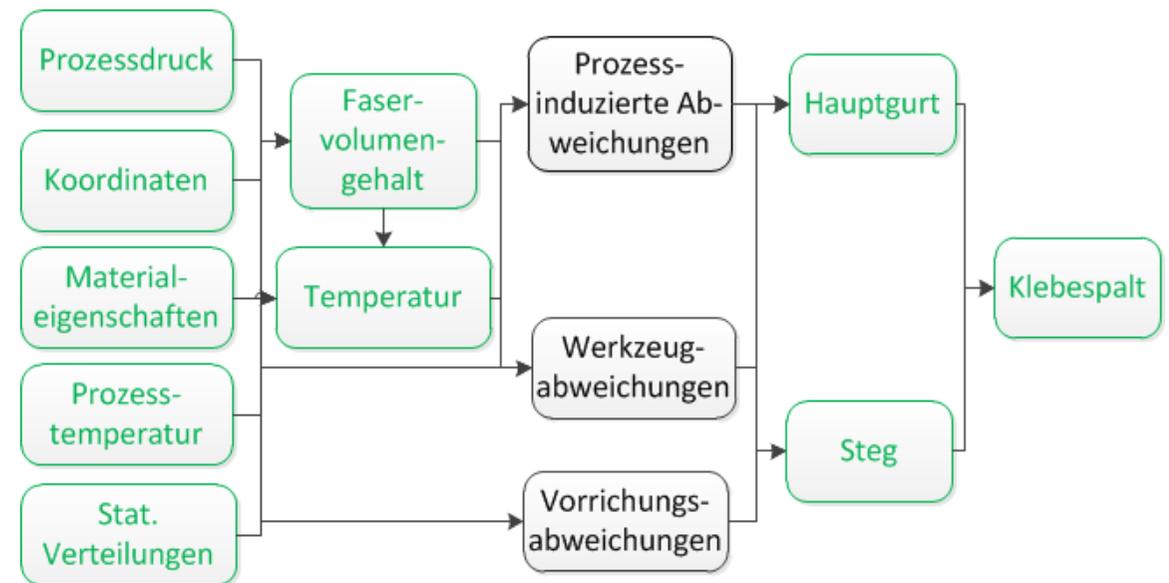
Quelle: Masterthesis Sven Ropte



## Toleranzoptimierte Fertigung - Toleranzanalyse

Das Toleranzmanagementsystem ist vollständig, wenn der Einfluss aller kritischen Parameter in der physikalischen Einheit der Schlüsselcharakteristik darstellbar ist.

Die Toleranzanalyse beginnt mit der Schlüsselcharakteristik und liefert verbesserte Inputparameter



Module der Toleranzbetrachtung für den Klebespalt von RB

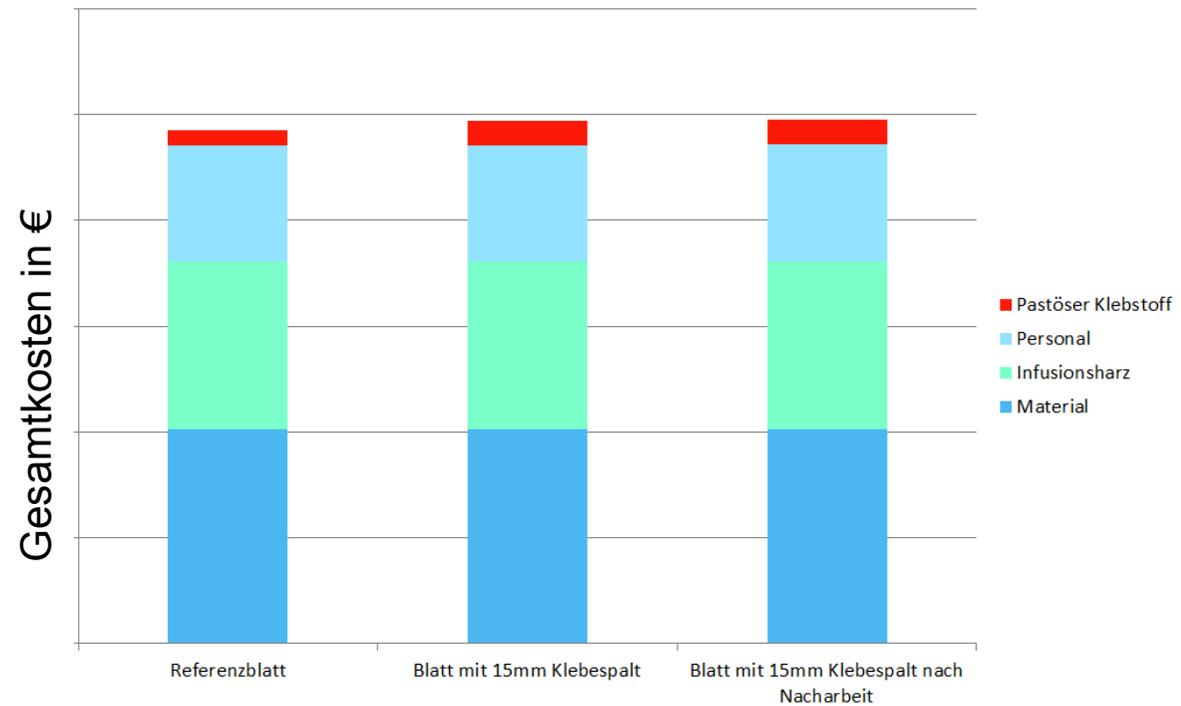


## Toleranzoptimierte Fertigung -Kostenanalyse

Auswirkungen der Toleranzspanne des Klebespalt auf die Gesamtkosten:

- Ideal Referenzblatt mit 7mm Klebespalt
- Blatt mit 15mm Klebespalt
  - +5,4%
- Blatt mit 15mm Klebespalt nach Nacharbeit (6h)
  - +5,6%

Für den vorliegenden Fall gilt:  
**Leichter, präziser, kostengünstiger!**



Quelle: Ali Al-Lami



# Ausblick

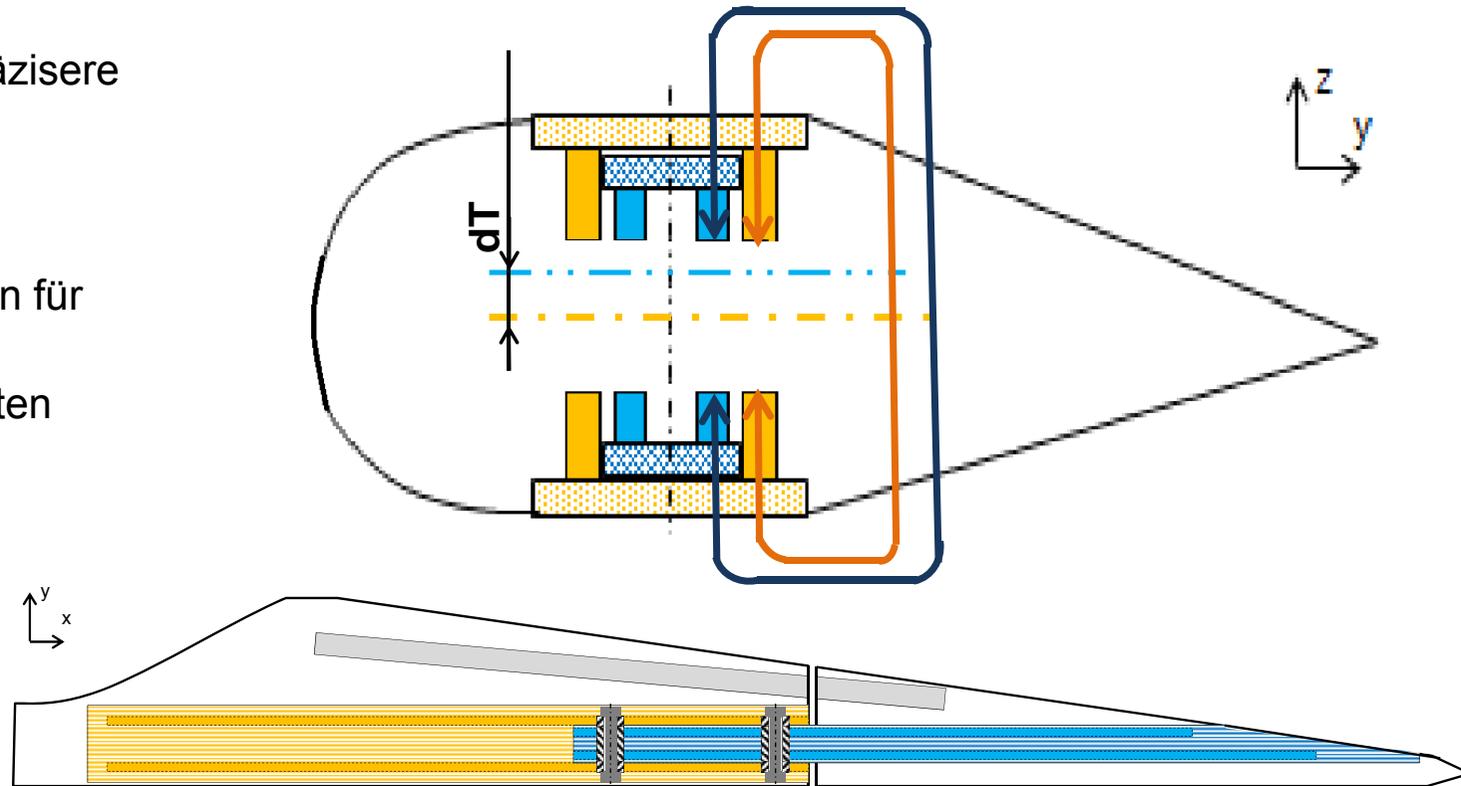
Neue Designmöglichkeiten durch präzisere Fertigung

## Segmentierte Rotorblätter

- Verbesserte Transportmöglichkeiten für große Rotorblätter
- Vereinfachte Fertigungsmöglichkeiten

## Herausforderungen:

- Robuste Verbindungskonzepte
- Fertigung der Trennstelle innerhalb der Toleranzvorgaben

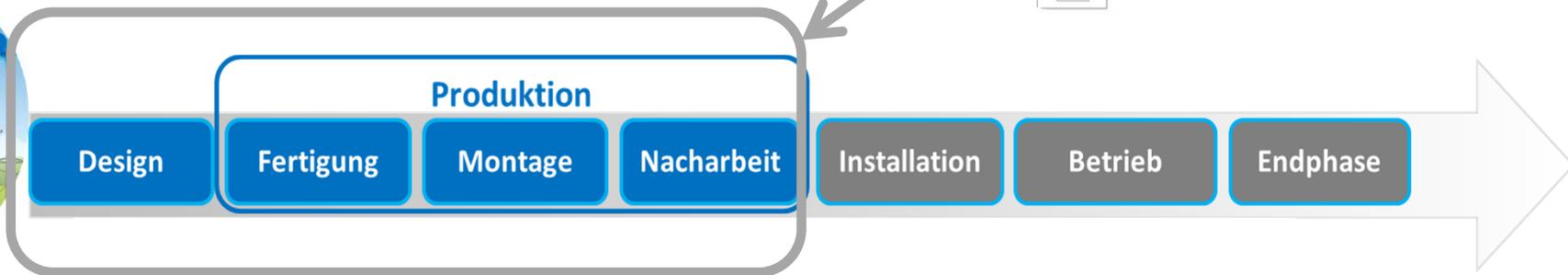
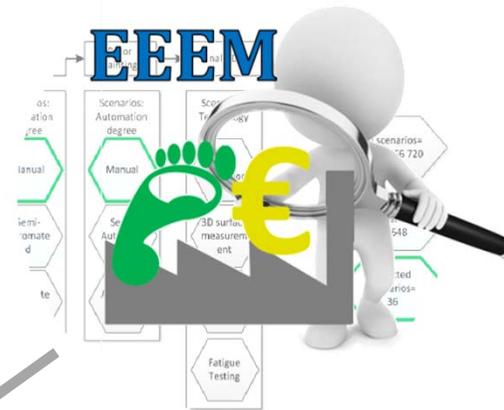


Teilungskonzept Rotorblatt  
Quelle: Lutz Beyland DLR FA-FLB



## Ausblick

- Verknüpfung des Toleranzmanagements mit Kostenbewertung  
(*Eco Efficiency Assessment Model*) zur Bewertung
- Erweiterung zur Kostenabschätzung während der Designphase  
(*Eco-Efficiency Estimation Model*)



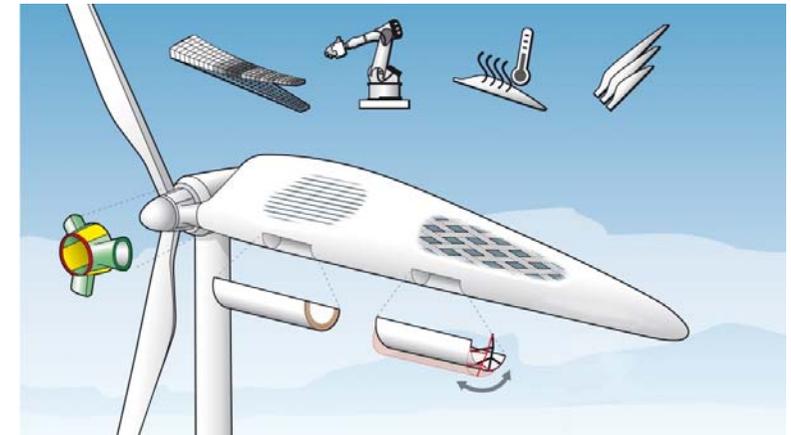
Lebenszyklus des Rotorblatts

Quelle: Ali Al-Lami



## Zusammenfassung

- Toleranzoptimierte Fertigung als Methode zur reproduzierbaren Qualitätsverbesserung bei der Herstellung von Rotorblättern
  - Herausforderung der Identifikation der kritischen Pfade innerhalb der Toleranzketten
  - Modellierung des Einflusses der Inputfaktoren in der physikalischen Dimension der Schlüsselcharakteristik
  - Verknüpfung in der Toleranzsynthese und Optimierung der Prozessparameter in der Toleranzanalyse
- 
- Verknüpfung der Toleranzbetrachtung mit Kostenbewertung und Auslegungsmodulen
  - Anwendung für komplexere Bauteile wie segmentierte Rotorblätter



**Dipl.-Ing. Birgit Wieland**

**German aerospace center**

Faserverbundtechnologie

Institut für Faserverbundleichtbau und  
Adaptronik

Lilienthalplatz 7  
D-38108 Braunschweig

phone +49 531 295-2911

e-mail [Birgit.Wieland@dlr.de](mailto:Birgit.Wieland@dlr.de)

homepage [www. DLR.de/FA/](http://www.DLR.de/FA/)

