

ZLP – Zentrum für Leichtbauproduktionstechnologie

# Einsatzmöglichkeiten von simulationsunterstützten Autoklavprozessen

A. Tripmaker, W. Fröhlingsdorf\*, H. Ucan,  
M. Bludzuweit\*

\*MET Motoren- und Energietechnik GmbH

Präsentiert von  
A. Tripmaker



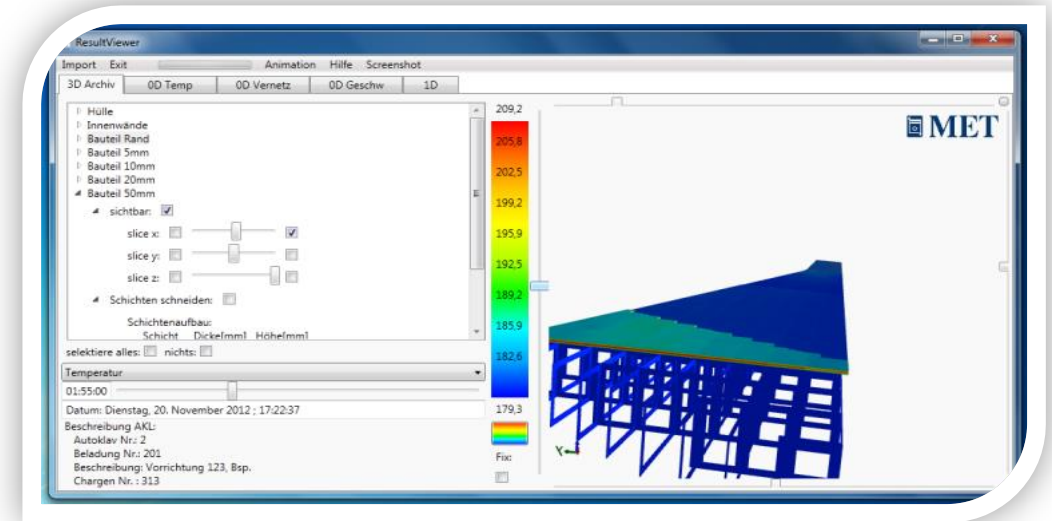
Wissen für Morgen



# Simulationsunterstützte Autoklavprozesse

## Agenda

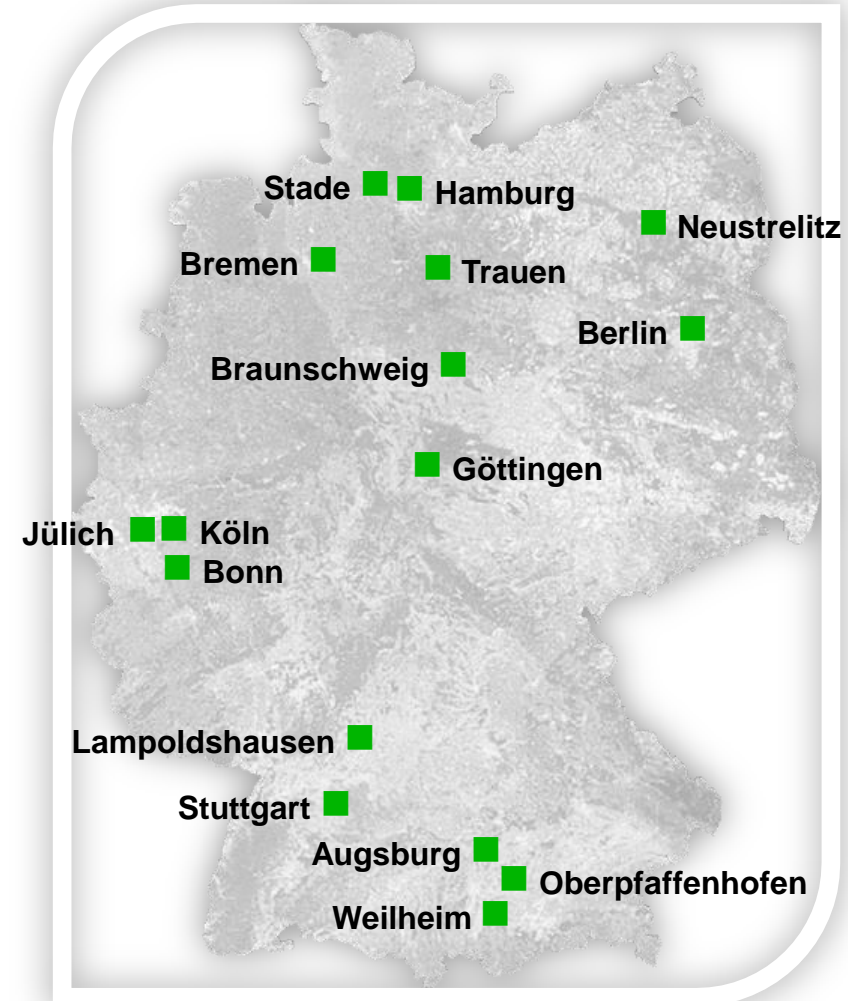
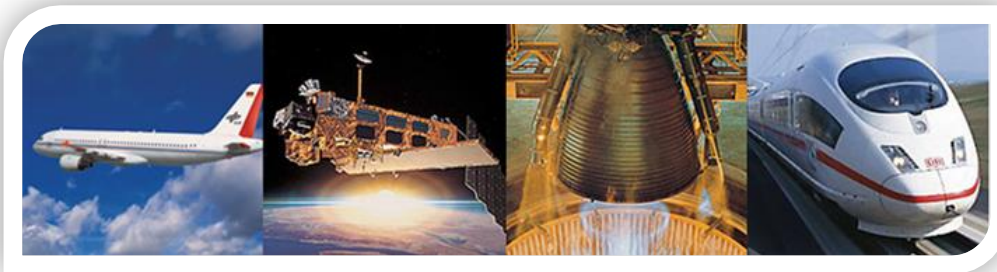
- Einleitung
- Vorstellung BALU
- Simulationsverfahren
- Virtueller Autoklav
- Einsatzmöglichkeiten
- Zusammenfassung und Ausblick



# Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.

## Standorte und Personal

- Circa 7.700 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter arbeiten in
  - 32 Instituten und Einrichtungen
  - In 16 Standorten
- Außenbüros in
  - Paris, Brüssel, Washington, Tokio
- Forschungsgebiete
  - Luft- und Raumfahrt, Energie und Verkehr





# Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.

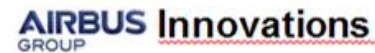
## Zentrum für Leichtbauproduktionstechnologie im CFK-Nord in Stade



- Produktionstechnologie Einzelkomponenten
- Virtuelle Faserverbund-Produktentwicklung



- Montagetechnik
- Fügetechnik
- Montage von Prototypen



- Textiltechnik
- Prozesstechnik
- Leichtbau



- Grundlagenforschung Materialsysteme (z.B. neue Harzsysteme)

Profile  
NTH



TECHNISCHE UNIVERSITÄT  
CAROLO-WILHELMINA  
ZU BRAUNSCHWEIG



TU Clausthal



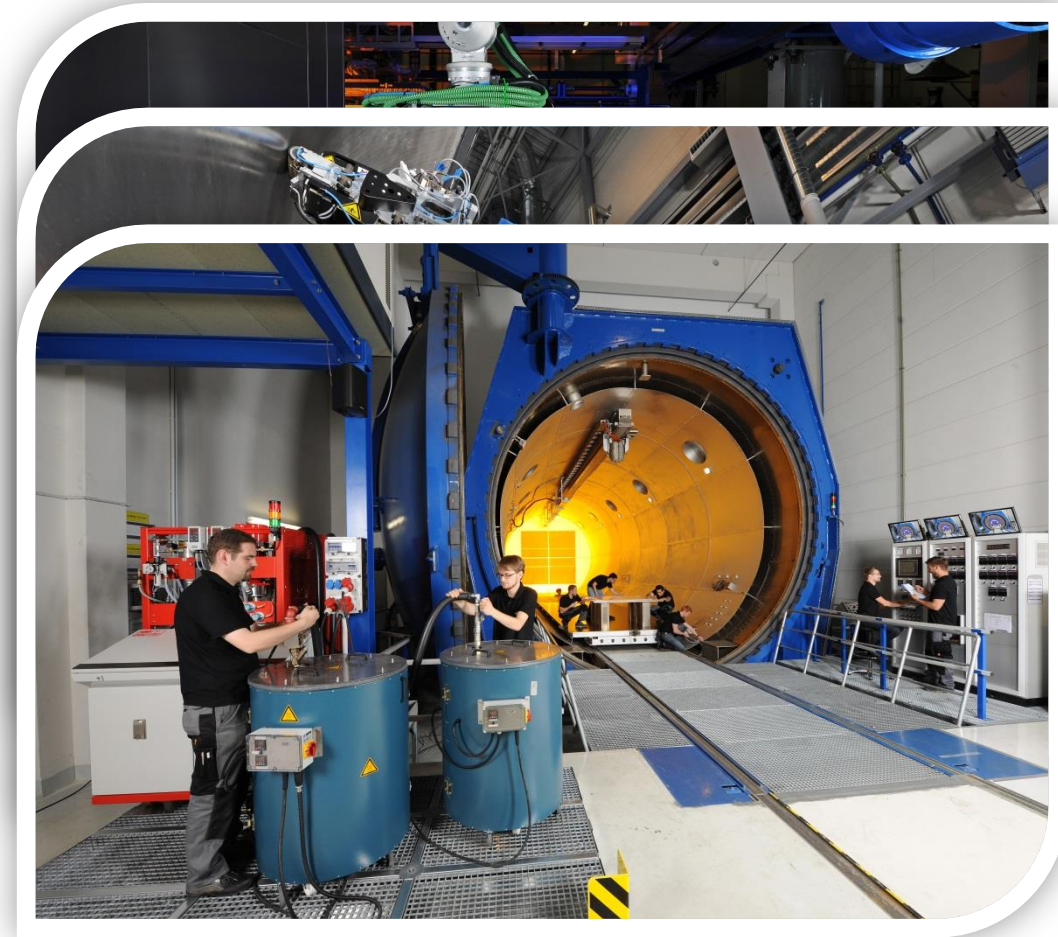
Leibniz  
Universität  
Hannover

20.000 m<sup>2</sup> für Kooperation und Innovation

# Zentrum für Leichtbauproduktionstechnologie

## Forschung im Industriemaßstab

- Projekt Evo - Endkonturnahe Volumenbauteile
  - Vollständig automatisierte Prozesskette zur Fertigung komplexer Faserverbundbauteile in hohen Stückzahlen
- Projekt GroFi - Großbauteile in Fiber- Placementtechnologie
  - Koordinierte Roboter mit kombinierter AFP und ATL Technologie zur automatisierten Fertigung von Großbauteilen
- Projekt OnQA - Online Qualitätssicherung im Autoklav
  - Optimierung der Aushärtungsprozesse von Großbauteilen mithilfe sensor- und simulationsgestützter Informationen

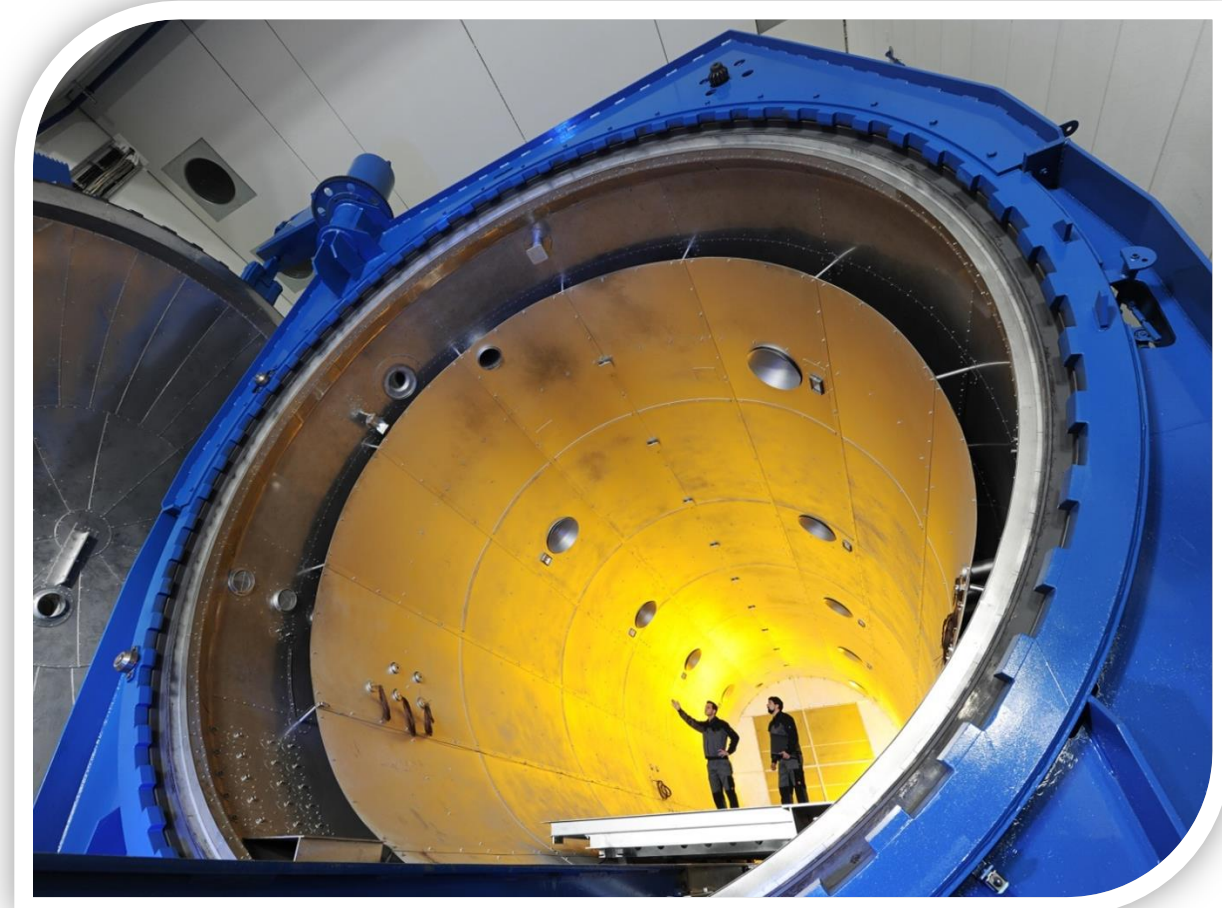




# Zentrum für Leichtbauproduktionstechnologie

## B.A.L.U. – Biggest Autoclave Laboratory Unit

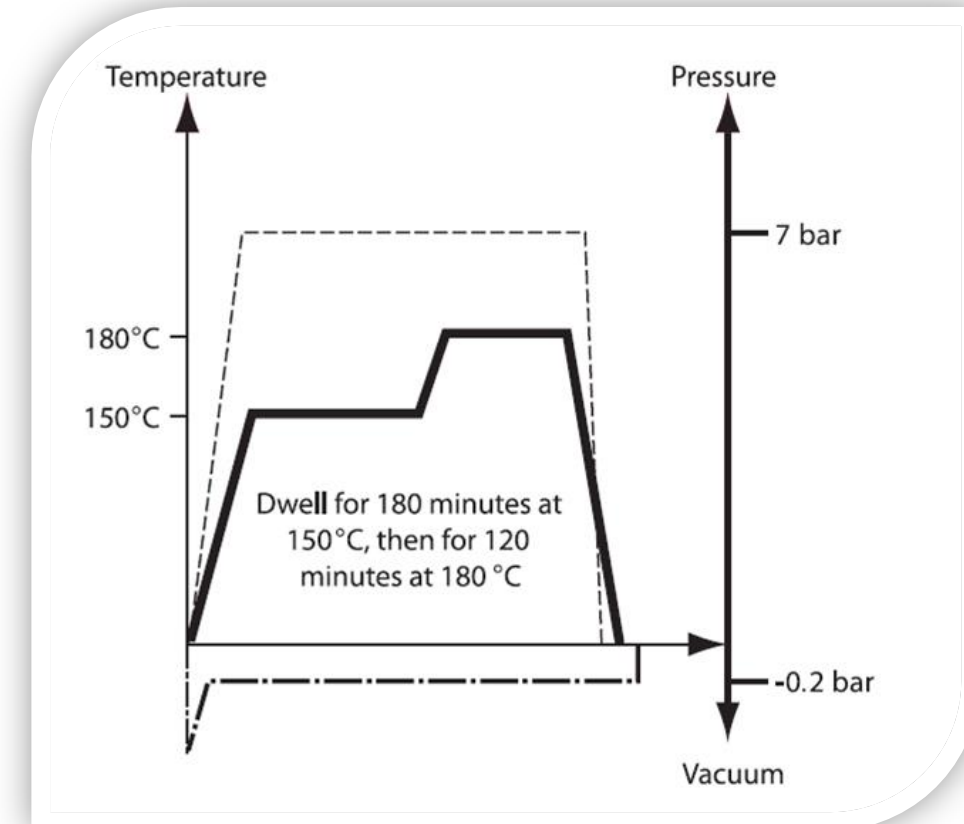
- Technische Daten:
  - Beladungslänge 20 meter
  - Beladungsdurchmesser 5,8 meter
  - Max. Betriebstemperatur 420°C
  - Max. Betriebsdruck 10 bar
  
- Aktuelle Forschungsgebiete
  - Optimierung des Aushärtungsprozesses anhand
    - einer neuartigen Autoklavsteuerung
    - einer Echtzeit- Autoklavsimulation
    - neuer Sensortechnologien



# Aushärtungsprozesse im Autoklav

## Stand der Technik

- Gegenwärtige Autoklavprozesssteuerungen und –regelungen fahren einen vorgegebenen Temperatur- und Druckzyklus ab
- Regelung des Prozesses nach
  - Lufttemperatur
  - Werkzeugtemperatur (Cold Spot)
- Temperaturerfassung erfolgt punktuell durch vereinzelte Thermoelemente
- **Die Temperatur stellt ein wichtiges Stellglied im Aushärteprozess von Bauteilen dar**



Quelle: Hexcel

# Simulationsunterstützter Autoklavprozess

## Zielsetzung

- Im Autoklaven werden qualitäts- und lebensdauerbestimmende Parameter des Bauteils erzeugt
- Eine Simulation der Prozesse wie der *Virtuelle Autoklav* leistet einen wichtigen Beitrag zum tieferen Verständnis
- Bisher zwei Simulationstypen verfügbar:
  - **Eindimensionale Simulation:**
    - Schnell
    - Keine Temperatur- und Aushärtegradsimulation innerhalb des CFK-Bauteils
  - **3D-Simulation:**
    - Langwierig (Simulation eines 10h Autoklavzyklus dauert mehrere Tage)
    - Alle wichtigen Informationen werden geliefert
- **Ziel des virtuellen Autoklaven ist es eine 3D-Simulation aufzubauen, die echtzeitfähig ist und alle qualitätsrelevanten Daten liefert.**

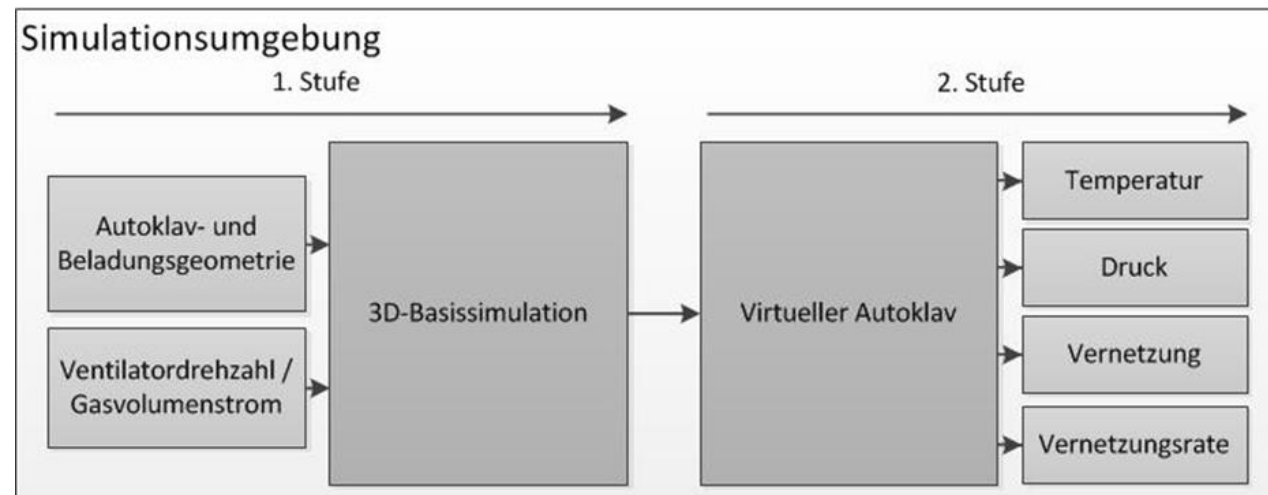




# Simulationsunterstützter Autoklavprozess

## Simulationsverfahren

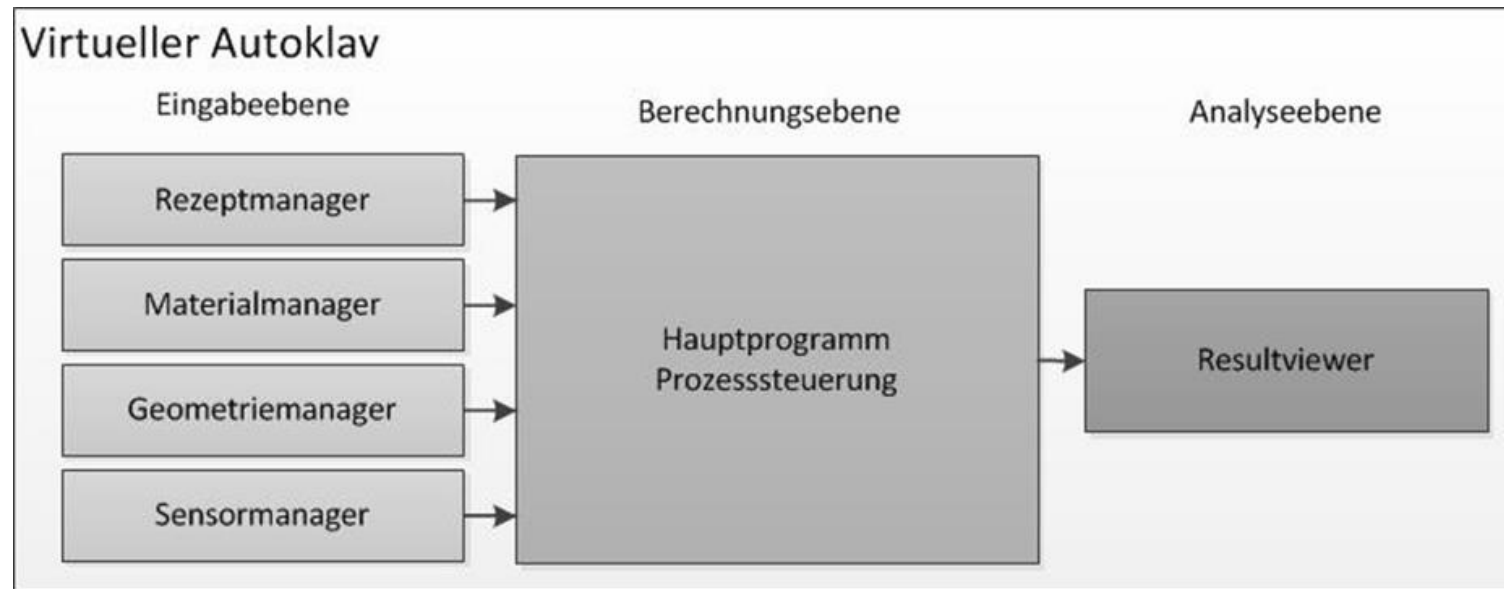
- Entwicklung einer zweistufigen Simulation
  - 1. Stufe (3D-Basissimulation):
    - Strömungsberechnung (Annahme: Strömungsfeld von der Bauteiltemperatur unabhängig)
    - Berechnung der Verteilung der Wärmeübergangszahlen auf der Bauteiloberfläche (CFD-Simulation)
  - 2. Stufe (Virtueller Autoklav):
    - Numerische Berechnung der Temperaturverteilung in den Festkörpern
    - Reaktionskinetik und Wärmefreisetzung durch Polymerisation



# Simulationsunterstützter Autoklavprozess

## Virtueller Autoklav

- Einzelprogramme die in drei Ebenen aufgeteilt sind:
  - Eingabeebene: notwendige Parameter für die Simulation
  - Berechnungsebene: Physikalische Berechnung des Autoklavprozesses
  - Analyseebene: Ergebnisdarstellung, die den realen Autoklaven übertrifft
- **Sehr realitätsnah, vergleichbare Handhabung eines realen Autoklaven**



# Virtueller Autoklav Programme

## Programm

### Rezeptverwaltung:

Eingabe der  
Prozessvorgaben

Reale Rezeptverwaltung

### Materialmanager:

Definition von  
Materialien und  
deren Kennwerten



Real verwendetes Material

## Simulation

Virtuelle Rezeptverwaltung

Virtueller Materialmanager



# Virtueller Autoklav Programme

## Geometriemanager:

Definition von  
Geometrien für die  
Autoklavbeladung



Real verwendete Bauteil- und  
Werkzeuggeometrie



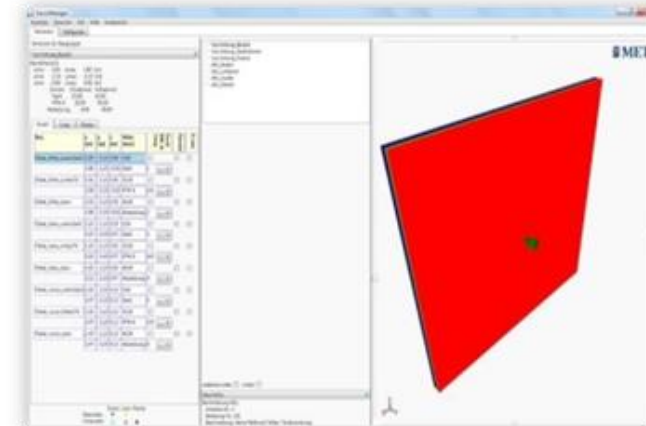
Virtueller Geometriemanager

## Sensormanager:

Eingabe aller  
Sensoren im  
Autoklaven



Temperatursensor am Formwerkzeug

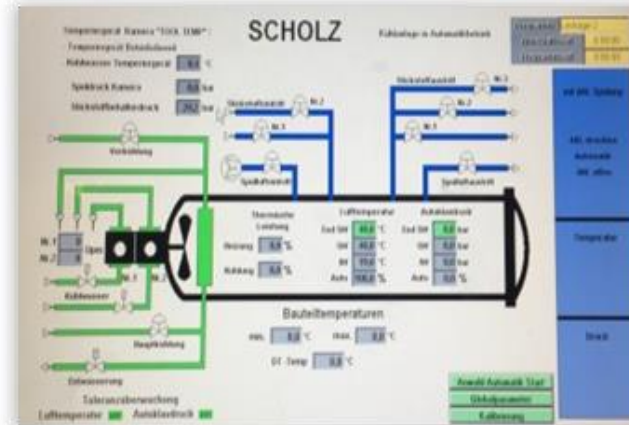


Positionierung eines virtuellen  
Temperatursensors

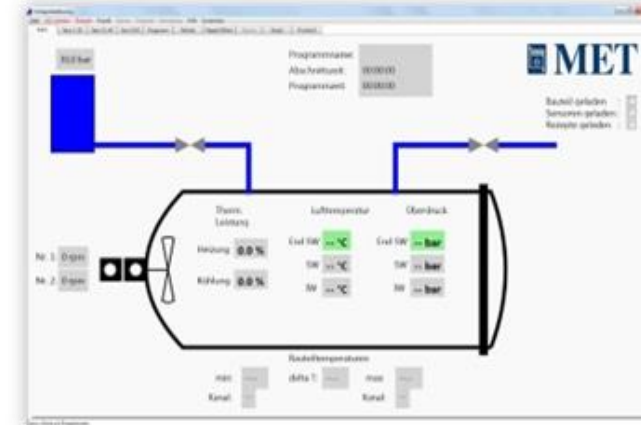
# Virtueller Autoklav Programme

## Prozesssteuerung:

Durchführung der physikalischen Berechnungen des virtuellen Autoklaven



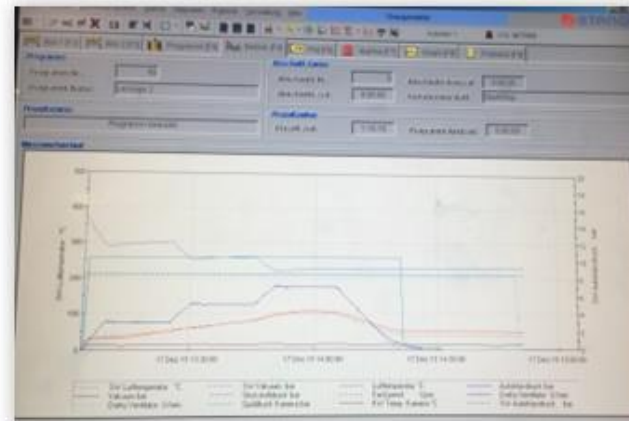
Reale Prozesssteuerung



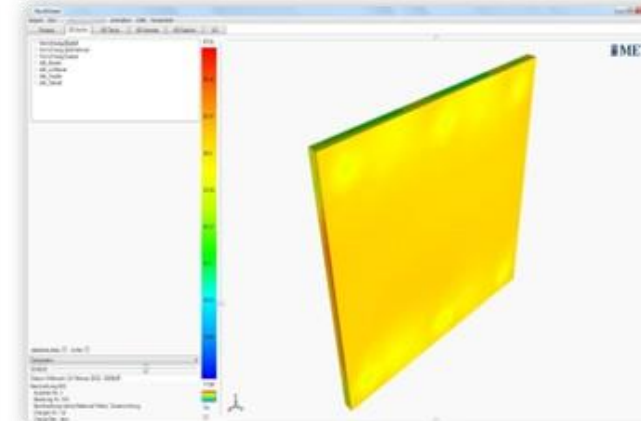
Virtuelle Prozesssteuerung

## Resultviewer:

Visualisierungsprogramm für die Berechnungsergebnisse



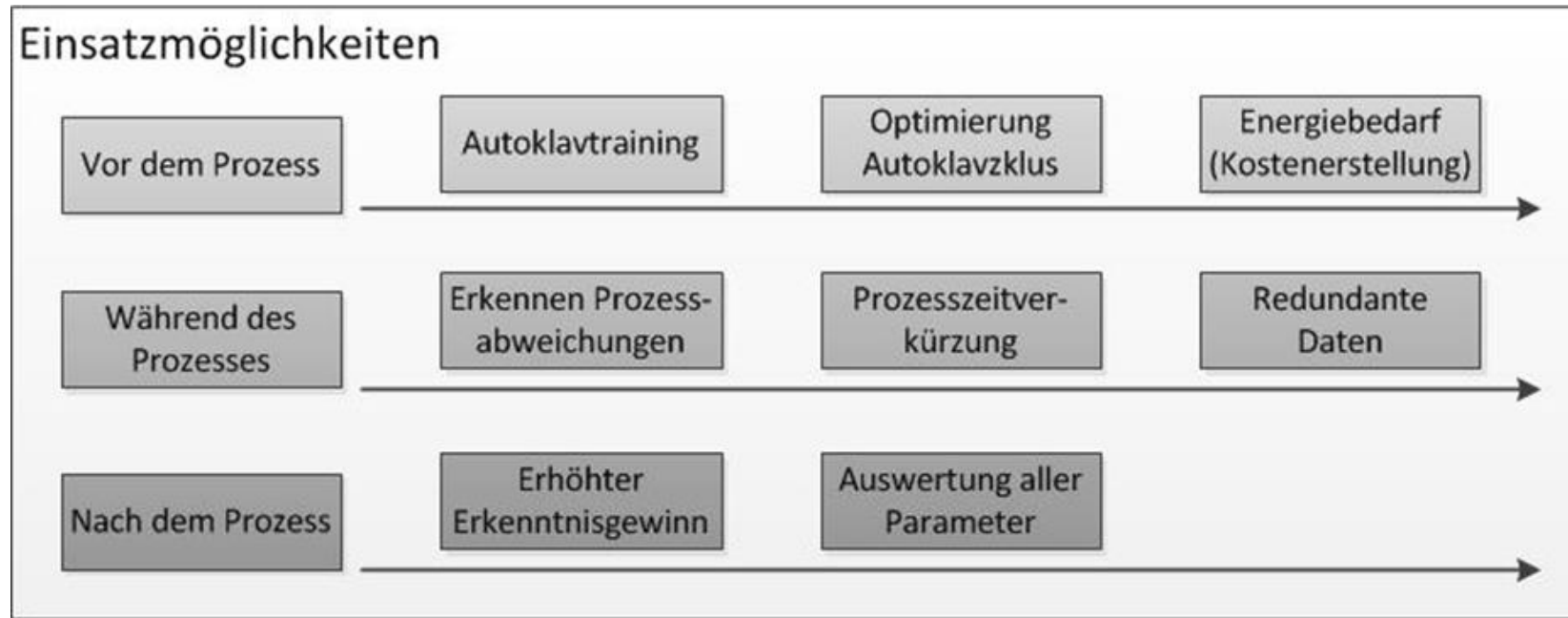
Chargenauswertung



Resultviewer

# Virtueller Autoklav

## Einsatzmöglichkeiten





# Einsatzmöglichkeiten

## Vor dem Autoklavprozess

### ➤ Autoklavtraining

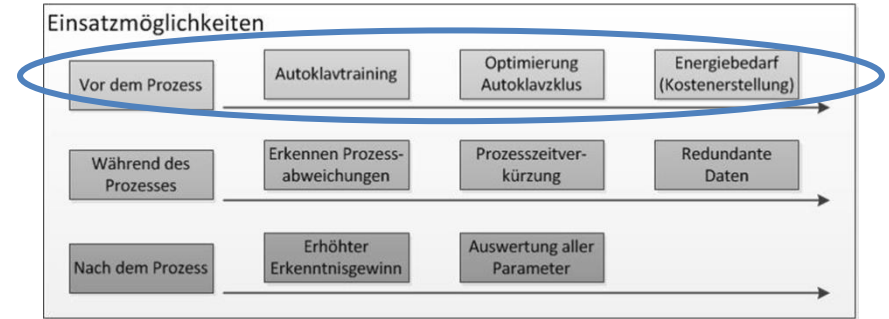
- Ausbildung / Training für Autoklavfahrer
- Auswirkungen von Parameteränderungen
- Prozesszustände und Risikosituationen können erzeugt und Gegenmaßnahmen ausprobiert werden

### ➤ Optimierung Autoklavzyklus

- Prozessverbesserung durch Optimierung der Strömungsführung oder Autoklavdimensionierung
- Änderung von Leistungsparametern / Autoklavzyklus
- Anpassung des Vorrichtungsdesigns, der Beladungsauswahl und –anordnung

### ➤ Energiebedarf (Kostenerstellung)

- Berechnung des Energiebedarfs
- Senkung der Betriebskosten
- Erhöhte Investitionssicherheit



# Einsatzmöglichkeiten

## Während des Autoklavprozesses

### ➤ Erkennen von Prozessabweichungen

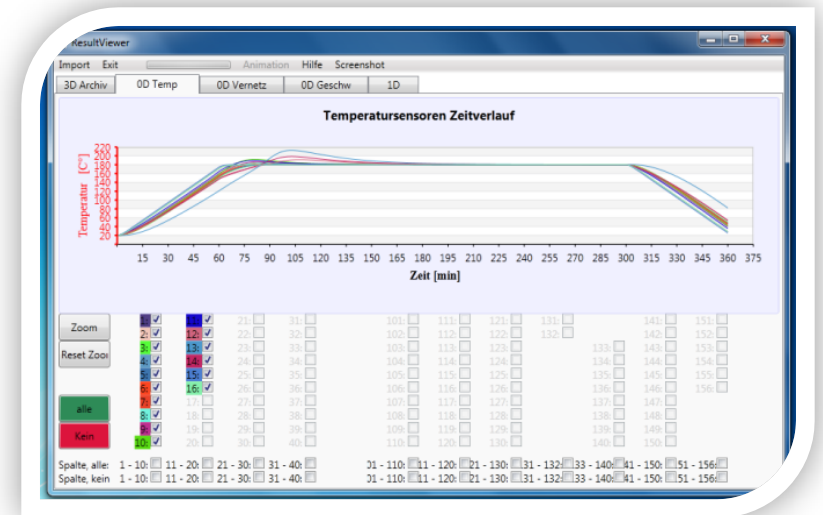
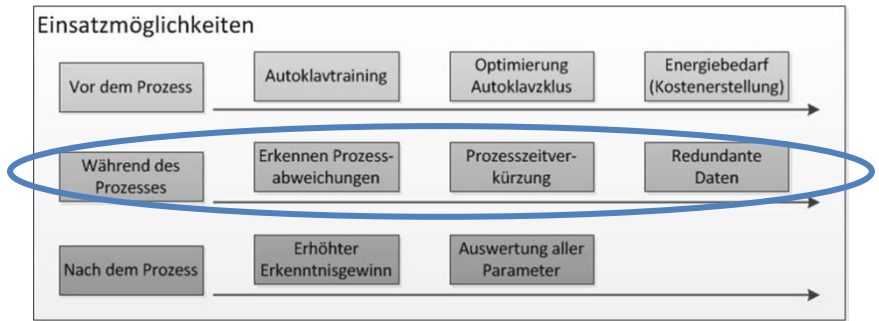
- Vorseilende Simulation
- Frühzeitiges Identifizieren von Prozessabweichungen
- Rechtzeitiges Einleiten korrekativer Maßnahmen

### ➤ Prozesszeitverkürzung

- Genaue Zustandsüberprüfung des Bauteils möglich
- Aushärtegrad kann in Simulation dargestellt werden
- Reduzierung der Prozesszeit auf ein Minimum

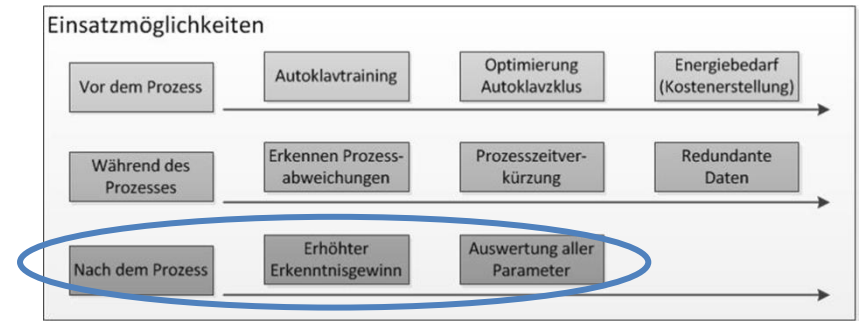
### ➤ Redundante Daten

- Bei Ausfall der Sensorik sind redundante Daten vorhanden
- Durch Interpolation und Simulation können fehlende Daten kompensiert werden



# Einsatzmöglichkeiten

## Nach dem Autoklavprozess



### ➤ Erhöhter Erkenntnisgewinn

- Bauteilparameter wie Aushärtegrad, Eigenspannungen, Schrumpf, Bauteildicke und –kontur können numerisch berechnet werden
- Erhöhter Erkenntnisgewinn über den Bauteilzustand
- Freigabe von gefährdeten Bauteilen ohne zerstörende Prüfung durch Auswertung der Parameter

### ➤ Auswertung aller Parameter

- Sammlung aller Autoklavparameter
- Statistische Auswertung aller Parameter möglich





# Zusammenfassung und Ausblick

## Virtueller Autoklav

- Projekt *OnQA* (Online Qualitätssicherung im Autoklaven) von 2009-2014:
  - Aufbau des Prototypen *Virtueller Autoklav*
  - Entwicklung *Rezeptmanager*, *Sensormanager*, *Prozesssteuerung* und *Resultviewer*
  - Validierung der Simulation innerhalb des Toleranzbereiches
  - Material, Bauteilgeometrie und –position im Autoklaven konstant und nicht variabel
- Projekt *PROTEC NSR* (Production Technologies for Next Short Range) von 2016-2018:
  - Alle Parameter sollen variabel sein → Öffnung der Programmschnittstellen
  - *Materialmanager*: Ermöglicht die Eingabe unterschiedlicher Materialien und deren Parameter (Formeditor)
  - *Geometriemanager*: unterschiedliche Bauteilgeometrien können in die Simulation geladen werden
- **Öffnung der beiden essentiellen Schnittstellen ist notwendig, um bei der Abbildung von realen Autoklavprozessen die Einsatzmöglichkeiten des *Virtuellen Autoklaven* zur Simulation voll ausschöpfen zu können.**



# Vielen Dank

A. Tripmaker, W. Fröhlingsdorf\*, H. Ucan,  
M. Bludzuweit\*  
\*MET Motoren- und Energietechnik GmbH

Präsentiert von  
A. Tripmaker



Wissen für Morgen



# Referenzen

- [1] Witten, E. ; Kraus, T; Kühnel, M.; Composite-Marktbericht 2015 - Marktentwicklungen, Trends, Ausblicke und Herausforderungen; AVK - Industrievereinigung verstärkte Kunststoffe; 2015
- [2] Meyer, M.; Herstellung von kohlenstofffaserverstärkter Kunststoffbauteilen mithilfe von Mikrowellen; Forschungsbericht 2007-06, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.; 2007
- [3] Ucan, H.; Liebers, N.; Kleineberg, M.; Wiedemann, M.; Sensor and Real-Time-Process-Simulation Guided Autoclave Process Control for Composite Production; ICAS Conference 2012; 24. - 28. Sept. 2012; Brisbane, Australia
- [4] Krombholz, C.; Ucan, H. et al.; Abschlussbericht: Faserverbundgerechte Großbauteile und Online-Qualitätssicherung im Autoklaven (GRONQA). DLR Projektbericht. IB 131-2014/079; 2014
- [5] Karkanias, P.I.; Partridge, I.K.: Modelling the cure of a commercial epoxy resin for applications in resin transfer moulding. Polym. Int. 41, 183–191 (1996)
- [6] Dumont, F.; Fröhlingsdorf, W.; Weimer, C.: Virtual autoclave implementation for improved composite part quality and productivity, CEAS Aeronaut J (2013)
- [7] Bludzuweit S., Fröhlingsdorf W., Graeber M.: Continuous Simulation-Aided Development of Autoclave Facilities for CFRP High-Performance Components, CFK Convention 2007, Stade
- [8] Bludzuweit M., Fröhlingsdorf W.: Simulation-Based Optimisation of the Heating, Cure and Cooling Processes of PREPREG Series CFRP Components, CFK Convention 2008, Stade
- [9] Kröger H., Fröhlingsdorf W.: Simulation-based optimization of the manufacturing process for a composite marine propeller, CFK Convention 2012, Stade

