

# Einsatzmöglichkeiten von simulationsunterstützten Autoklavprozessen

---

A. Tripmaker, W. Fröhlingdorf\*, H. Ucan, M. Bludszuweit\*

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik, Ottenbecker Damm  
12, 21684 Stade, Germany

\*MET Motoren- und Energietechnik GmbH, Erich-Schlesinger-Str. 50, 18059 Rostock, Germany

*Kurzfassung: In diesem Beitrag werden die Einsatzmöglichkeiten von simulationsunterstützten Autoklavprozessen anhand des Virtuellen Autoklaven vorgestellt. Auf Grundlage einer zweistufigen Simulationsumgebung entsteht ein Werkzeug, das nicht nur in der Lage ist direkt messbare und qualitätsrelevante Parameter zu berechnen, sondern auch die Berechnung echtzeitfähig durchzuführen, so dass die analysierten Daten direkt in einen laufenden Autoklavprozess eingespeist werden können. Das bringt den Vorteil Prozesse vor und während der Polymerisation im Autoklaven optimal zu gestalten und somit qualitätsgesicherte, reproduzierbare Bauteile aus kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK) mit einer minimalen Ausschussrate zu fertigen.*

## 1 Einleitung

Die strategischen Ziele der Luftfahrt erfordern einen hohen Prozentsatz an Hochleistungsstrukturbauteilen aus CFK im Flugzeug. Die Aushärtung von solchen Großbauteilen erfolgt überwiegend in Autoklaven, wo der Werkstoff seine volle Leistungsfähigkeit entwickelt, die u.a. von einer vollständigen Polymerisation abhängig ist. Somit werden in diesem Prozessschritt die qualitäts- und lebensdauerbestimmenden Parameter des Bauteils erzeugt. Durch eine Simulation der Prozesse im Inneren des Autoklaven wird ein wichtiger Beitrag zum tieferen Verständnis des Autoklavprozesses geliefert. Der hierzu entwickelte *Virtueller Autoklav* simuliert in einem digitalen Computermodell diese Prozesse. [1][2][3]

Bisher veröffentlichte Simulationen für Autoklavprozesse sind entweder schnell und eindimensional oder dreidimensional, aber dafür langwierig. Die eindimensionalen Simulationen erlauben keine Temperatur- oder Aushärtegradsimulation innerhalb des CFK-Bauteils. Diese Daten sind aber durchaus relevant um die minimalen und maximalen Temperaturen am Bauteil zu kennen und hieraus Rückschlüsse über die Bauteilqualität zu ziehen. 3D-Simulationen sind in der Lage all diese Informationen zu liefern, allerdings dauert die Simulation eines 10h Autoklavzyklus mehrere Tage. Diese lange Rechendauer macht es unmöglich die Simulation parallel zum realen Zyklus ablaufen zu lassen. [4][5][6]

Das Ziel des *Virtuellen Autoklaven* ist es ein Konzept einer 3D-Simulation auszuarbeiten und aufzubauen, das in der Lage ist echtzeitfähig zu sein und alle qualitätsrelevanten Daten liefert, ohne das hierfür ergebnisbeeinflussende Annahmen getroffen werden müssen.

## 2 Simulationsverfahren

Eine Berechnung der Vorgänge im Autoklaven bedarf mehrerer gekoppelter Simulationen, der Strömungssimulation, der Temperaturberechnung der Umluftströmung und der Festkörper sowie der Berechnung der Reaktionskinematik innerhalb der Faserverbundwerkstoffe. Strömungssimulationen sind zuverlässig, aber auch aufwendig und langwierig, weshalb ein Simulationsmodell entwickelt wurde, welches auf physikalischen Vereinfachungen basiert. Die Berechnung der Strömung erfolgt im Vorfeld. Es wird angenommen, dass das Strömungsfeld von der Bauteiltemperatur unabhängig ist. Die Ergebnisse der Strömungsberechnung stehen anschließend dem *Virtuellen Autoklaven* zur Verfügung, welcher die transiente Temperaturfeldberechnung in den Festkörpern ausführt (s. Abbildung 1). Dieser Ansatz erlaubt es, Prozesssimulationen des Autoklavprozesses durchzuführen, die deutlich schneller als die reale Prozesszeit ablaufen. [7]

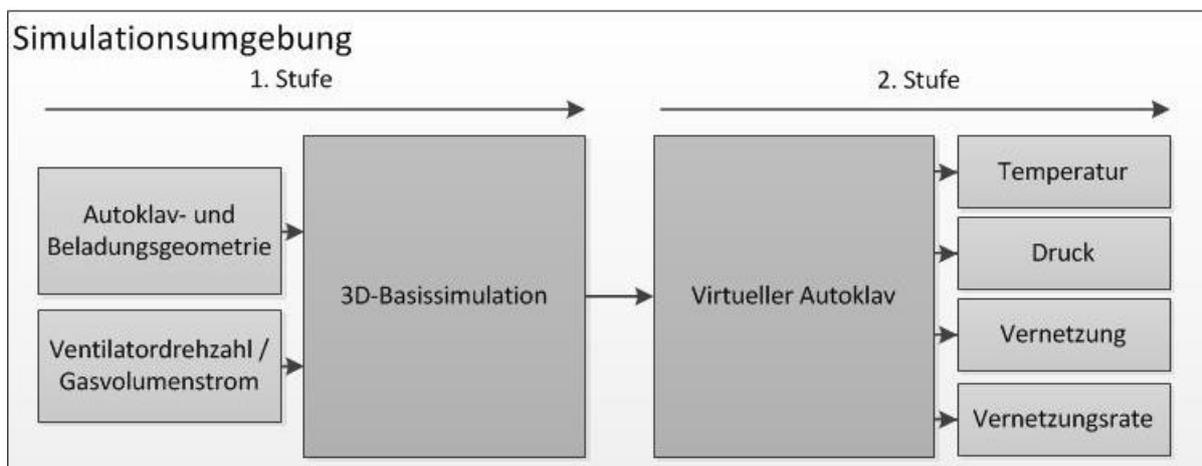


Abbildung 1: Schema der zweistufigen Simulation

Bei der virtuellen Autoklavtechnologie kann für Autoklavprozesse mit einer konstanten Beladungsanordnung der Rechenaufwand deutlich reduziert werden. Die Idee ist die Verteilung der Wärmeübergangszahl auf der Beladungsfläche mit einer 3D-Basisimulation (CFD-Simulation) in der ersten Simulationsstufe zu berechnen und diese für den virtuellen Autoklav in der zweiten Simulationsstufe zur Verfügung zu stellen (s. Abbildung 1). Die Verteilung der Wärmeübergangszahl auf der Beladungsfläche bildet mit der Vorgabe des variablen Gastemperaturzyklus die thermische Randbedingung für den virtuellen Autoklaven. Die numerische Berechnung der Temperaturverteilung in den Festkörpern, einschließlich der Reaktionskinetik und Wärmefreisetzung durch Polymerisation des Epoxidharzes ist mit einem deutlich geringeren Aufwand verbunden als die zeitabhängige Lösung der Navier-Stokes-Gleichungen zur Simulation des turbulenten Strömungsfeldes im Autoklaven. Weiterhin können auch Änderungen beim Autoklavdruck und der Ventilator Drehzahl mit geeigneten Korrelationen erfasst werden. [8][9]

Für die Berechnung der Reaktionskinetik und Wärmefreisetzung der Aushärtung des Epoxidharzes ist es notwendig ein entsprechendes Modell für den eingesetzten Harztyp zu entwickeln. Im einfachsten Fall können hierfür Daten aus der Literatur verwendet werden (z.B.

für RTM6). Falls keine geeigneten Daten für einen speziellen Harztyp vorliegen muss ein Modell mit Hilfe von Versuchen erstellt werden. Bei einer solchen Modellentwicklung werden die gemessenen Temperaturen in einem CFK-Bauteil zur Modellvalidierung mit simulierten Temperaturen verglichen. Weiterhin sind im virtuellen Autoklaven auch die thermischen Stoffwerte des Vakuumaufbaus und der Vorrichtung unter Autoklavbedingungen zu definieren.

### 3 Virtueller Autoklav

Der Aufbau des Virtuellen Autoklaven ist in insgesamt drei Ebenen aufgeteilt (s. Abbildung 2). In der ersten Ebene befindet sich die sogenannte *Eingabeebene*, wo alle notwendigen Parameter für die Simulation bereitgestellt werden müssen. Das Kernstück des *Virtuellen Autoklaven* ist das Hauptprogramm, welches in der Programmanwendung als Prozesssteuerung bezeichnet wird. Hier werden alle physikalischen Berechnungen des Autoklavprozesses auf der Grundlage der vorgegebenen Parameter durchgeführt. Als Ergebnis stehen Daten für vorher definierte Parameter und Positionen am Prozessgut zur Verfügung, die in der Analyseebene mithilfe des sogenannten *Resultviewers* begutachtet werden können.

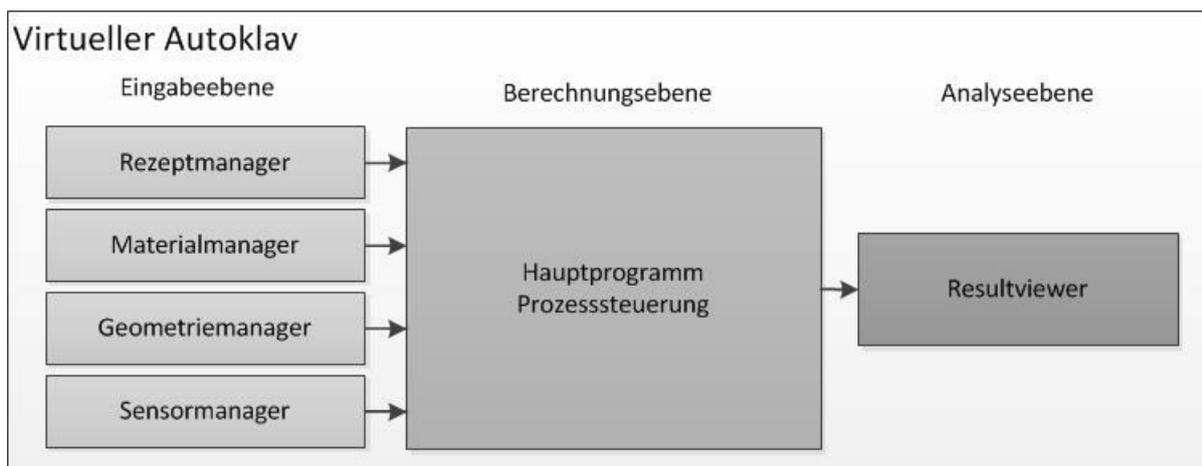
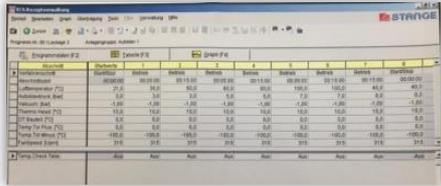
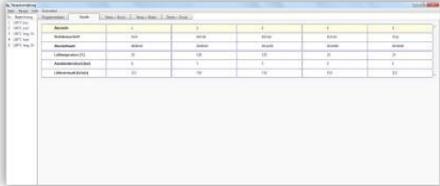
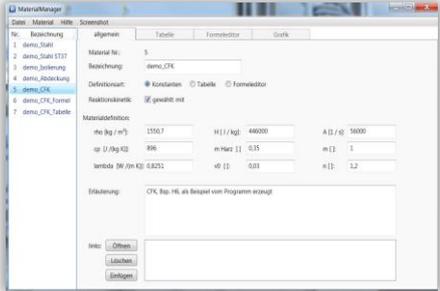
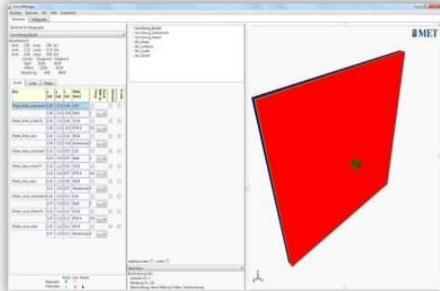
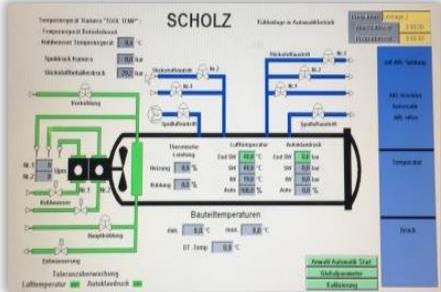
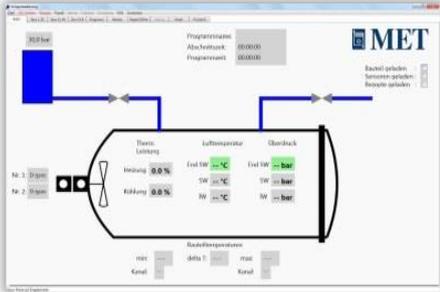


Abbildung 2: Aufbau des Virtuellen Autoklaven

Zum besseren Verständnis des *Virtuellen Autoklaven* werden in Tabelle 1 die einzelnen Programmmodule beschrieben. Es sind insgesamt sieben miteinander gekoppelte Einzelprogramme entstanden, die zur Bedienung bzw. Anwendung des *Virtuellen Autoklaven* zur Verfügung stehen. In Tabelle 1 werden diese einzelnen Programmmodule beschrieben und der Bezug zum realen Autoklavprozess hergestellt. Eine *Rezeptverwaltung*, *Sensormanager*, *Prozesssteuerung* und *Anlagenbedienung* sind beim realen Autoklaven ebenfalls vorhanden. Die Ergebnisdarstellung (*Resultviewer*) übertrifft beim *Virtuellen Autoklaven* die des realen Autoklaven, weil mehr Sensoren sowie Temperatur- und Vernetzungsgradverteilungen dargestellt werden können. Das Konzept des Programmaufbaus des *Virtuellen Autoklaven* ist somit sehr realitätsnah. Die Handhabung des virtuellen Autoklaven soll dadurch vergleichbar zu dem eines realen Autoklaven sein.

Tabelle 1: Vorstellung der im virtuellen Autoklaven verwendeten Programme

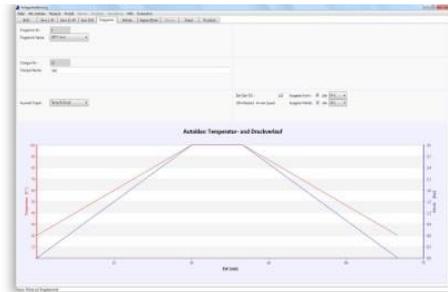
Programm	Realität	Simulation
<p><b>Rezeptverwaltung:</b> Eingabe der Prozessvorgaben</p>	 <p>Reale Rezeptverwaltung</p>	 <p>Virtuelle Rezeptverwaltung</p>
<p><b>Materialmanager:</b> Definition von Materialien und deren Kennwerten</p>	 <p>Real verwendetes Material</p>	 <p>Virtueller Materialmanager</p>
<p><b>Geometriemanager:</b> Definition von Geometrien für die Autoklavbeladung</p>	 <p>Real verwendete Bauteil- und Werkzeuggeometrie</p>	 <p>Virtueller Geometriemanager</p>
<p><b>Sensormanager:</b> Eingabe aller Sensoren im Autoklaven</p>	 <p>Temperatursensor am Formwerkzeug</p>	 <p>Positionierung eines virtuellen Temperatursensors</p>
<p><b>Prozesssteuerung:</b> Durchführung der physikalischen Berechnungen des virtuellen Autoklaven</p>	 <p>Reale Prozesssteuerung</p>	 <p>Virtuelle Prozesssteuerung</p>

### Anlagenbedienung:

Bedienoberfläche  
des virtuellen  
Autoklaven



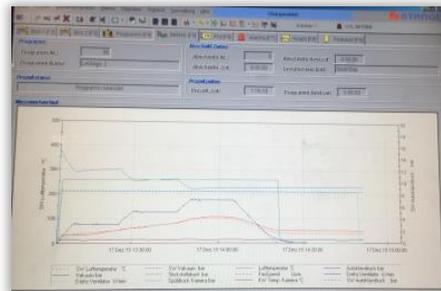
Reale Anlagenbedienung



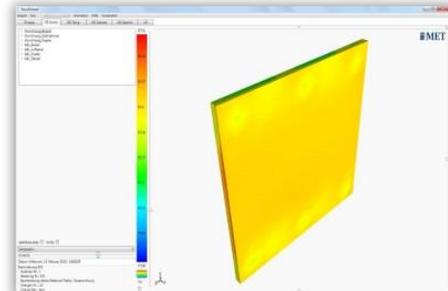
Virtuelle Anlagenbedienung: Vorgabe  
unterschiedlicher Temperaturzyklen

### Resultviewer:

Visualisierungs-  
programm für die  
Berechnungs-  
ergebnisse



Chargenauswertung



Resultviewer

Mit den vorgestellten Programmen ist es möglich, für ein vorgegebenes Arrangement von Autoklav und Beladung die Berechnung beliebiger Prozesse durchzuführen. Die Berechnungszeit kann wahlweise der Realzeit entsprechen oder um ein vielfaches kürzer sein.

Der *Virtuelle Autoklav* soll als Simulator für den realen Autoklavprozess verwendbar sein, in welchem in einer Rezeptverwaltung die Prozessparameter (Temperatur, Druck, Ventilator-drehzahl in anhängig der Zeit) vorgegeben werden müssen. Möchte man Temperaturen am Bauteil nach dem Prozess auswerten, müssen im *Sensormanager* Anzahl, Position und Typ definiert werden. Diese können sich an oder innerhalb der Beladung befinden und beschränken sich zurzeit auf die Parameter *Temperatur*, *Vernetzungsgrad* und *Vernetzungsrate*. Es stehen mit diesen zeitabhängigen Sensordaten (s. Beispiel in Abbildung 3) deutlich mehr Informationen zur Verfügung als beim realen Autoklavprozess gemessen werden können. Die Anzahl der *Virtuellen Sensoren* kann beliebig hoch sein, ohne zusätzliche Kosten zu erzeugen. Es können virtuell mehr Sensoren als im Realprozess eingesetzt werden, welche auch die Temperatur und den Vernetzungsgrad innerhalb des Bauteils virtuell messen können. Die zu erwartende Bauteilqualität kann mit den Sensordaten bestimmt werden, indem auch Temperatur- und Vernetzungsgraddifferenzen im Bauteil für die Prozessbeurteilung mit verwendet werden.

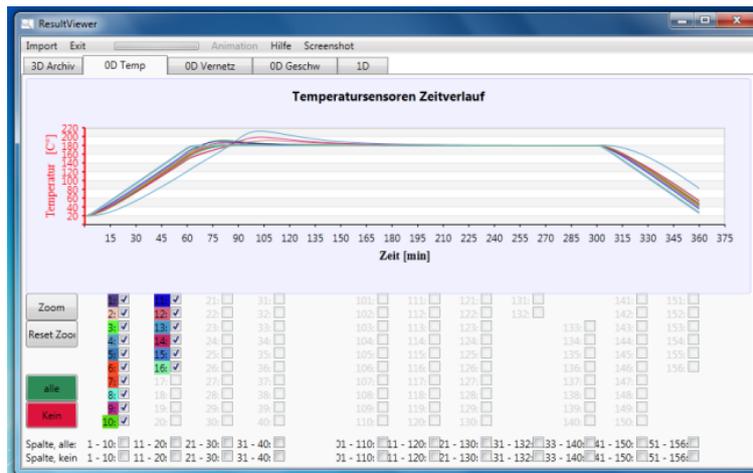


Abbildung 3: Simulationsbeispiel eines *Virtuellen Autoklaven* – zeitabhängige Verläufe von Temperatursensoren

Zusätzlich zu der Möglichkeit der Darstellung von zeitabhängigen Sensorverläufen besteht auch die Möglichkeit das Temperatur- oder Vernetzungsgradfeld für eine beliebige Prozesszeit im Beladungsquer- oder -längsschnitt darzustellen. Die Auswerteebene kann beliebig in x,y,z-Richtung verschoben werden (s. Abbildung 4). Die Darstellung der Temperatur- und Vernetzungsgradverteilungen lassen erkennen, wo minimale und maximale Temperaturen und Vernetzungsgrade entstehen und geben einen Überblick über die räumliche Verteilung in der Beladung.

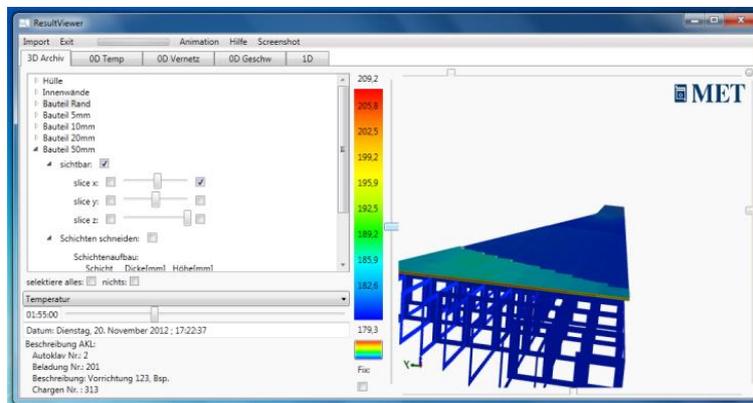


Abbildung 4: Beispiel für die Auswertung des Temperaturfeldes im *Virtuellen Autoklaven*

#### 4 Einsatzmöglichkeiten

Mit den vorgestellten Werkzeugen ist es möglich den Autoklavzyklus für definierte Parameter zu simulieren und sich zeitabhängige Sensorverläufe und Verteilungen von Temperatur und Vernetzungsgrad anzeigen zu lassen. Für den Virtuellen Autoklaven ergeben sich verschiedene Einsatzmöglichkeiten, die sich in drei Kategorien einteilen lassen: vor dem Prozess (realer Autoklavprozess), während des Prozesses und nach dem Prozess (s. Abbildung 5).

Zu den Einsatzmöglichkeiten vor dem Prozess zählen zunächst die Ausbildung und das Training von Autoklavfahrern. Es können mit geringem Aufwand Autoklavparameter geändert und deren Auswirkung auf den Autoklavprozess untersucht werden. Es ist möglich beliebige Prozessverläufe zu berechnen. Schwierige Prozesszustände bzw. Risikosituationen können gefahrlos erzeugt und Gegenmaßnahmen ausprobiert werden. Der Benutzer des virtuellen Autoklaven erhält damit die Möglichkeit das Zeitverhalten unterschiedlicher Prozesse besser zu verstehen und im Autoklavbetrieb im Bedarfsfall sicherer reagieren zu können. Zusätzlich zur Prozesssicherung können Optimierungsmaßnahmen zur Steigerung der Produktivität und Bauteilqualität sowie Verringerung des Energieverbrauchs entwickelt und getestet werden, indem der Autoklavzyklus und die Ventilator Drehzahl gezielt verändert werden.

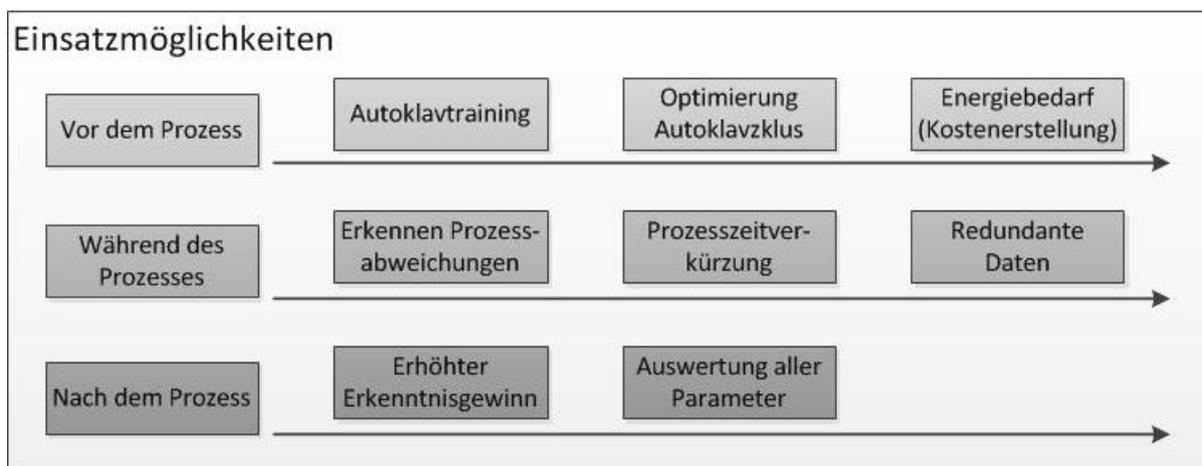


Abbildung 5: Einsatzmöglichkeiten der Autoklavsimulation

Eine mit dem virtuellen Autoklaven durchgeführte Prozessanalyse zeigt den realen Prozess einschließlich eventueller Schwachstellen. Daraus können im Allgemeinen Verbesserungsmöglichkeiten abgeleitet werden. Prozessverbesserungen können erreicht werden durch Optimierung:

- des Autoklavprinzips bzw. der Strömungsführung,
- der Autoklavdimensionierung (z.B. Durchmesser, Länge, Nutzraum),
- von Leistungsparametern (Ventilator, Wärmetauscher),
- des Vorrichtungsdesigns,
- des Autoklavzyklus,
- Autoklavsteuerungs- und Regelungssystems,
- der Beladungsauswahl und -anordnung

Bei den genannten Prozessverbesserungen ist zu beachten, dass jede Veränderung der Geometrie von Autoklav oder Beladung eine neue 3D-Basisimulation erforderlich macht, wodurch sich der Simulationsaufwand entsprechend erhöht. Schwerpunkt für den Virtuellen Autoklaven sollte deshalb die Variation des Autoklavzyklus oder der Ventilator Drehzahl und die Analyse der Auswirkung dieser Parameteränderungen auf den Prozessverlauf sein.

Eine gezielte Prozessverbesserung erlaubt eine Erhöhung der Bauteilqualität durch Reduzierung von Temperatur- und Vernetzungsgraddifferenzen sowie der Maximaltemperatur (hot spot). Die Gefahr von Delaminationen und Verformungen kann deutlich verringert werden. Die Platzierung von Thermoelementen an z.B. kältesten oder wärmsten Bauteilbereichen zur sicheren Prozessbeurteilung kann optimiert werden. Des Weiteren besteht die Möglichkeit mit Hilfe des virtuellen Autoklaven den Energiebedarf für unterschiedliche Autoklavfahrten zu berechnen und hiermit eine valide Kostenaufstellung zu generieren. Die Betriebskosten können durch Analyse von Maßnahmen zur Senkung des notwendigen Energieaufwandes verringert werden. Durch optimale Abstimmung eines neuen Autoklaven bzw. Fertigungsmittels auf das Bauteil wird eine erhöhte Investitionssicherheit erreicht, indem die Wirksamkeit der Anlage und ihre technischen Parameter bereits in der Planungsphase bestimmt werden.

Während des Autoklavprozesses dient eine vorausseilende Simulation dazu frühzeitig Prozessabweichungen zu identifizieren und korrektive Maßnahmen einleiten zu können. Autoklavprozesse sind sehr komplex und besitzen eine hohe Trägheit, was bedeutet das Regelungen einen hohen Einfluss auf den Prozessverlauf haben können. Sollen z.B. exotherme Reaktionen durch hohe Temperaturen im Laminat vermieden werden, muss die Autoklavtemperatur lange vor dem Eintreten des Phänomens heruntergeregelt werden. Durch die Simulation kann zudem der genaue Zustand des Bauteils überprüft werden. Autoklavprozesse haben häufig längere Haltephasen zur Bauteilaushärtung als erforderlich, da der Bauteilzustand nicht bekannt ist und eine komplette Aushärtung des Bauteils garantiert werden muss. Durch die Simulation kann der Aushärtegrad der sich im Autoklav befindlichen Bauteile anschaulich dargestellt werden und so die Prozesszeit auf ein Minimum reduziert werden. Im Falle eines Ausfalls der Sensorik bietet die Simulation die Möglichkeit durch Interpolation und redundante Daten die fehlenden Daten zu kompensieren. [3]

Während Sensorsysteme nur direkt messbare Parameter erfassen können, sind numerische Simulationen in der Lage andere wichtige Parameter zu errechnen. Diese Werte können unter anderem den Aushärtegrad, Eigenspannungen, Schrumpfung, Bauteildicke und –kontur beinhalten. Diese Werte können nach dem Prozess ausgewertet werden, um einen erhöhten Erkenntnisgewinn über das Bauteil zu bekommen und eventuell gefährdete Bauteile ohne weitere zerstörende Prüfungen freizugeben. Des Weiteren werden durch die Simulation weitere Qualitätsparameter aufgezeichnet und gesammelt die statistisch ausgewertet werden können.

Da die Simulation mindestens in Echtzeit ablaufen sollte muss ein Kompromiss zwischen Genauigkeit und Rechengeschwindigkeit getroffen werden. Die Toleranz zwischen Simulation und Messung wurde mit  $\pm 5\%$  als akzeptabel festgelegt und in ersten Versuchen als einhaltbar nachgewiesen. Das Ziel ist es neue Erkenntnisse aus der Verknüpfung der Sensordaten mit den Simulationsdaten abzuleiten. Die Software ermöglicht eine innovative Prozesskontrolle in Abhängigkeit zu der gewünschten Produktqualität und den Produkteigenschaften sowie eine gesteigerte Produktivität durch direkte Eingabe der Qualitätsparameter. [4]

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Innerhalb des Projektes *OnQA* (Online Qualitätssicherung im Autoklaven) von 2009 - 2014 wurde der Prototyp des *Virtuellen Autoklaven* aufgebaut und validiert. Mit dem Prototyp wurde die *Rezeptverwaltung*, der *Sensormanager*, die *Prozesssteuerung*, die *Anlagenbedienung* sowie der *Resultviewer* entwickelt. Es ist mit diesen Programmen möglich einen Autoklavprozess in Echtzeit zu simulieren. Die Validierungsergebnisse des Prototyps entsprechen den Erwartungen und liegen im Toleranzbereich zwischen simulierten und gemessenen Werten. Das Material, die Bauteilgeometrie sowie die Bauteilposition innerhalb des Autoklaven sind hierbei jedoch noch konstant und nicht variabel, was die Anwendbarkeit des Prototyps sehr einschränkt. [4]

Im Rahmen des Projektes *ProTec NSR* (Production Technologies for Next Short Range) mit einer Laufzeit von 2016 - 2018 werden die Arbeiten fortgesetzt und haben zum Ziel alle Parameter variabel gestalten zu können, indem der Prototyp mit neuen Programmschnittstellen ausgestattet wird. Mit Hilfe des neuen *Materialmanagers* wird es möglich sein unterschiedliche Materialien und deren Materialparameter über einen Formeditor in das Programm einzufügen. Weiterhin wird die Schnittstelle des *Geometriemanagers* definiert, womit unterschiedliche Bauteilgeometrien in die Simulation geladen werden können. Die Öffnung dieser beiden essentiellen Schnittstellen ist notwendig, um bei der Abbildung von realen Autoklavprozessen die Einsatzmöglichkeiten des *Virtuellen Autoklaven* zur Simulation voll ausschöpfen zu können.

## Literaturverzeichnis

- [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] Karkanis, 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] Bludszuweit S., Fröhlingsdorf W., Graeber M.: Continuous Simulation-Aided Development of Autoclave Facilities for CFRP High-Performance Components, CFK Convention 2007, Stade
- [8] Bludszuweit 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