

Digitaler Zwilling eines Autoklaven: Effizient Navigieren zur gewünschten Aushärtung

Digital twin of an autoclave: Efficient navigation to the desired curing

Unter einem digitalen Zwilling versteht man die möglichst vollständige Abbildung eines realen Produkts in einer geeigneten Datenstruktur mit geeigneten physikalischen Modellen. Das Zentrum für Leichtbau-Produktionstechnologie (ZLP) in Stade arbeitet an einem solchen digitalen Zwilling für seinen Forschungsautoklav zur besseren Vorhersage von Polymerisationsprozessen und deren Effizienzsteigerung: dem Virtuellen Autoklaven. Mit ihm steht heute ein Werkzeug zur Verfügung, welches den Polymerisationsprozess bei der Aushärtung eines real im Autoklav befindlichen Bauteils online vorhersagen kann. Mit Hilfe des Virtuellen Autoklaven ist man in der Lage, in den laufenden Prozess einzugreifen und man kann ihn auch optimieren. Während heute Aufheiz- und Abkühlraten sowie Haltezeiten statisch vorgegeben sind, kann mit dem Virtuellen Autoklav durch den Aushärteprozess „navigiert“ werden. Wie funktioniert diese Navigation?

Summary

A digital twin is a representative of a real system that uses the best physical models and data available to simulate the real behaviour. The ZLP in Stade is working on such a digital twin for more efficient polymerization processes in the autoclave. The result is the Virtual Autoclave. With the virtual autoclave a tool is available that on-line simulates the polymerization process with regard to that, what happens with areal manufactured component in the real autoclave. Thus, the Virtual Autoclave is capable to predict the future temperatures in the ongoing process in order to optimize it.

Die Navigation zum optimalen Autoklavzyklus

Die Analyse und Beschreibung des Materialverhaltens neuer Harzsysteme erfolgt mit dem sogenannten Zeit-Temperatur-Umwandlungs-Diagramm (ZTU). Dieses stellt das Materialverhalten anschaulich dar und ist jeweils spezifisch für ein Harzsystem. In Abhängigkeit von Prozesszeit und -temperatur zeigt das ZTU-Diagramm die prozessrelevanten Zustände des Harzes: den flüssigen, den gelartigen und den glasartigen Zustand. Die Erstellung der ZTU-Diagramme erfolgt mittels temperaturmodulierter Differenzkalorimetrie, wie beispielsweise dem TOPEM-Verfahren. Die bei diesen Verfahren gemessenen Wärmestromverläufe über Temperatur und Zeit gehen als Eingangsgrößen in die am Institut entwickelte Software CoPE ein. Diese passt das Modell der Reaktionskinetik des Harzes mittels numerischer Optimierung an die Messungen an. Das Modell der Reaktionskinetik kann die Erstellung von ZTU-Diagrammen mit einem deutlich verringerten Messaufwand effizienter machen, indem beispielsweise Simulationen Langzeitmessungen ersetzen. Als Ergebnis stehen die Parameter der Aushärtegleichung für das untersuchte Material zur Verfügung und bilden die Grundlage für die Beschreibung der Reaktionskinetik im Virtuellen Autoklaven.

Zielsichere Route

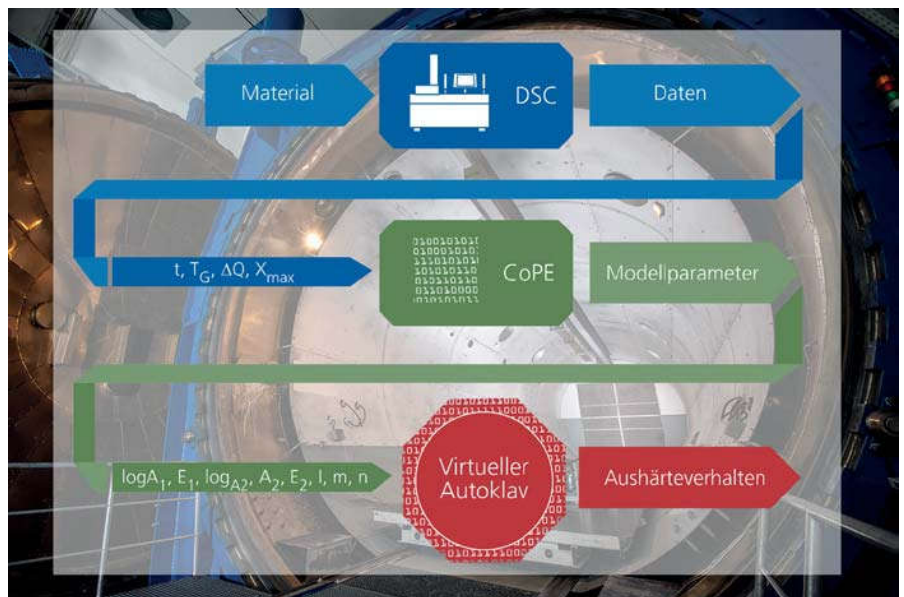
Wie ein Navigationsgerät bei einer Staumeldung nach einem Ausweichweg sucht, so navigiert das Modul *SafeCure* des Virtuellen Autoklaven die Temperatursteuerung bei Sensierung von Prozessabweichungen sicher zur geforderten Aushärtung. Das Modul *SafeCure* des Virtuellen Autoklaven kann auch für die Optimierung von Polymerisationsprozessen verwendet werden. In beiden Fällen berechnet es unter Verwendung von Echtzeitparametern aktualisierte Endzustände des Prozesses. Im Falle einer festgestellten Abweichung von Vorkalkulation und realem



DSC-TOPEM zur Analyse der Reaktionskinetik
DSC-TOPEM for the analysis of reaction kinetics

Prozess berechnet das Modul eine alternative Route, welche den Aushärteprozess trotzdem zum Ziel bringt. Aktuell liegt das Prozessziel bei einem Aushärtegrad von >95%. Die Berechnung der optimalen Prozessroute ist nur möglich, wenn das Materialverhalten als „digitale Karte“ vorliegt.

In der nächsten Entwicklungsstufe erhält der Virtuelle Autoklav ein Modul, welches die Vorhersage der auftretenden Eigenspannungen erlaubt. Damit stehen dem Modul *SafeCure* – wie beim Navigationsgerät die Auswahl zwischen der schnellsten Route und der kürzesten Route – weitere Optionen zur Verfügung, um den Prozess auch eigenspannungsminimal zu regeln.



Kartographierung des Materialverhaltens als Grundlage für die zielsichere Route
Mapping of material behavior as a basis for the target-oriented route



Autoren:
 Dipl.-Ing. Hakan Uçan
 Anja Haschenburger, M.A.
 Dr.-Ing. Alexandra Kühn
 Niklas Menke, M.Sc.
 Dipl.-Ing. Robert Hein