

OptPlanEnergie – Der Einsatz von Simulation und Optimierung zur Verringerung des Energiebedarfs bei der Produktion von Sicherheitsglas

OptPlanEnergie – Using Simulation and Optimization to Enhance the Energy-efficient Production of Tempered Glass

Frank Baumann, Heike Wilson, DUALIS GmbH IT Solution, Dresden (Germany),
fbaumann@dualis-it.de, hwilson@dualis-it.de

Stephan Seidel, Matthias Franke, Fraunhofer Institut für Integrierte Schaltungen,
Institutsteil Entwicklung Adaptiver Systeme, Dresden (Germany),
stephan.seidel@eas.iis.fraunhofer.de, matthias.franke@eas.iis.fraunhofer.de

Ulrike Gromnitza, Bischoff Glastechnik GmbH, Bretten (Germany),
ulrike.gromnitza@bgt-bretten.de

Abstract: In many industrial manufacturing processes energy use is one of the most important cost factors. Especially in energy-intensive industries like steel production or glass processing minimising energy use is a key measure to save resources and reduce manufacturing costs. The project OptPlanEnergie concentrates on the production of tempered glass. In this project we apply simulation and optimization techniques to identify and reduce energetic losses that occur during the fabrication process. The aim of the project is to supply a toolchain for creating high-performance simulation models of crucial production steps and integrating these models in scheduling frameworks to facilitate the optimization of loading sequences and capacity allocation to reduce energy consumption. In OptPlanEnergie we prototypically study the production of tempered glass, but our approach allows a simple adaptation to a wide range of industries.

1 Einführung

Bei vielen industriellen Prozessen zur Herstellung von Produkten und Waren ist der Energieeinsatz einer der größten Kostenfaktoren. Die Minimierung des Energieeinsatzes ist dabei speziell bei energieintensiven Herstellungsprozessen in der Glas- und Stahlindustrie ein Mittel, um einerseits Ressourcen zu schonen und andererseits Kosten zu sparen.

Im Rahmen des Projektes OptPlanEnergie soll der Energieeinsatz zur Produktion von Sicherheitsglas durch den Einsatz von Simulation und Optimierung gesenkt werden.

Dabei ist es das Projektziel, eine Toolchain zu erstellen, welche es ermöglicht, performante Simulationsmodelle des beteiligten Prozesses zu erzeugen und diese zur Optimierung der Produktionsreihenfolge und Auslastung der entsprechenden Arbeitsstationen einzusetzen. In OptPlanEnergie wird dazu prototypisch die Herstellung von Sicherheitsglas untersucht. Gleichzeitig ist der im Projekt entwickelte Ansatz jedoch so universell, dass jede Art von Produktionsprozess bzw. Stückgutprozess abgebildet werden kann.

Der vorliegende Beitrag stellt die Fortsetzung des auf der ASIM 2016 (Baumann et al. 2016) vorgestellten Projektansatzes dar, vertieft die darin angeführten Ansätze und erläutert die seitdem im Projekt erreichten Ziele. Es werden deshalb die bereits im o. g. Beitrag erläuterten Vorgehensweisen nur kurz rekapituliert. Dieser Beitrag gliedert sich entsprechend der drei Hauptsäulen des Projektes in die Abschnitte Datenanalyse, Modellbildung und Optimierung.

2 Datenanalyse

In diesem Abschnitt wird zunächst der technische Ablauf des untersuchten Temperprozesses beschrieben und im Anschluss die Erfassung und Aufbereitung der Energiemessdaten erläutert.

2.1 Temper-Prozess

Einscheiben-Sicherheitsglas (ESG) wird aus normalem Floatglas erzeugt, indem das Floatglas in einem Temperofen wärmetechnisch behandelt wird. Dabei wird es bis zur Transitionstemperatur erhitzt, bei der das Glas zu fließen beginnt, und anschließend sehr schnell in einer Gebläsekammer abgekühlt. Die dabei eintretende Aushärtung des Glases erzeugt innere Spannungen, welche beim Bruch des Glases zu einem charakteristischen Bruchbild mit sehr geringen Scherbrüchen führen. ESG wird neben vielen anderen Einsatzgebieten auch in der Baubranche zur Verkleidung von Fassaden verwendet.

Verbund-Sicherheitsglas (VSG) wird aus mehreren Lagen ESG hergestellt, indem die einzelnen Scheiben miteinander verklebt werden. Im Zentrum der Untersuchung stehen der Temperprozess und der verwendete Ofen sowie der nachgelagerte Abkühlprozess. Dieser wird ausschließlich mit Elektroenergie versorgt, d. h. die Heizung erfolgt über 27 elektrische Heizwendeln und die Kühlung über drei große Kühlgebläse, welche Außenluft in einem abgeschlossenen Raum um das Glas zirkulieren. Die Wärme der Abluft wird nicht zurückgewonnen. Ca. 80 % der Gesamtenergie werden für die Heizung, die restlichen 20 % für die Kühlung aufgewendet. Der Verbrauch weiterer Elektroenergieverbraucher ist im Vergleich dazu gering und wird nicht betrachtet.

2.2 Datenquellen

Als Herausforderung sind im Projekt die Modellbildung und die zugrundeliegende Datenanalyse zu sehen, da die Daten von Produktion und Energiebezug sowohl zeitlich und datentechnisch getrennt erfasst werden. In Abbildung 1 ist die Toolchain zur Datenanalyse dargestellt. Die Energiedaten werden minütlich von einem Energiemonitoringsystem erfasst und gespeichert und umfassen den Elektroenergieverbrauch von Heizung (max. 3 MW Leistungsaufnahme) und Kühlgebläse (max.

800 kW Leistungsaufnahme), da diese die größten Verbraucher im Ofenprozess sind. Ein Export der Energiedaten ist als Excel-Datei möglich.

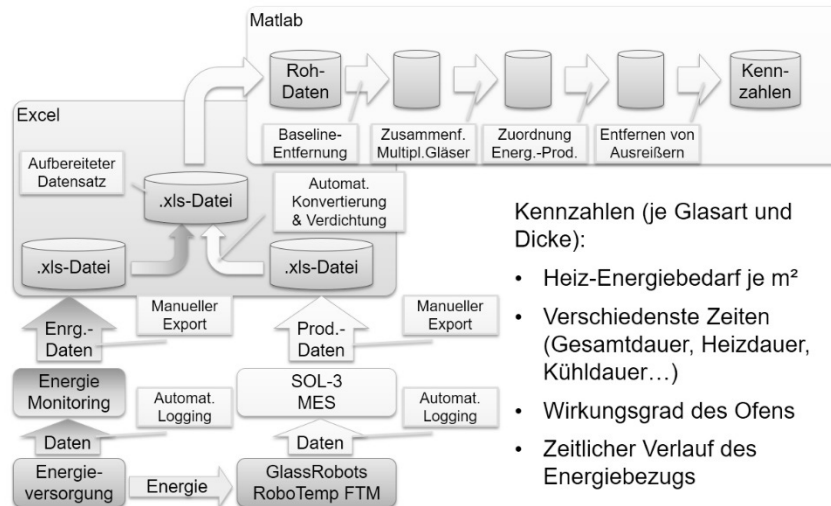


Abbildung 1: Toolchain für die Datenanalyse

Die Produktionsdaten jeder Glasscheibe werden über das von dem Glashersteller eingesetzte Enterprise Resource Planning System (ERP) SOL-3 erfasst und ebenfalls zentral gespeichert. Diese Daten umfassen u. a.:

- Glasart
- Dimension (Länge/Breite/Höhe)
- Auftrags- und Positionsnummern
- Fläche
- Meldezeitpunkte vor und nach dem Ofen

Ziel ist es dabei, die Auswertung, Bereinigung und Kombination beider Datenquellen so zu automatisieren, dass ohne manuelles Sichten und Sortieren aus der großen Datenmenge, welche durch minütliches Logging der Energiedaten und der produktgenauen Erfassung der Produktionsdaten anfällt, die für das Simulationsmodell relevanten Parameter extrahiert werden. Dabei stellt sich der menschliche Eingriff in den Produktionsprozess als besonders problematisch dar, da er zu nicht vorhersagbaren zeitlichen Schwankungen führt, welche bei der Datenanalyse erkannt und bereinigt werden müssen.

Beispielsweise erfolgt das Erfassen der Meldezeitpunkte rein manuell, indem vom verantwortlichen Ofenbediener der Barcode der Scheiben vom Begleitbogen eingescannt wird. Dabei ist der Zeitverzug zwischen Scannen und Start der Bearbeitung großen Schwankungen unterlegen und kann zwischen 30 Sekunden bis zu 20 Minuten betragen. Dieser Zeitverzug ist bedingt durch das Bearbeitungsregime am Ofen und die Handlungsabfolgen der einzelnen Mitarbeiter. Ziel der automatisierten Datenanalyse ist es, folgende Kennzahlen zu ermitteln:

- Energiebedarf zum Tempern für verschiedene Glastypen, Heiz- und Kühlzeiten, Prozesstemperaturen
- Standby-Energieverbrauch
- Energiebedarf bei Aufheizen
- Abkühlkurve, Zeitkonstanten beim Auskühlen

Diese Daten werden dazu genutzt, den Ofenprozess zu analysieren und charakteristische Kennzahlen (energetischer Grundbedarf des Ofens, Energiebedarf in Abhängigkeit der Glasparameter, Zeitkonstanten und typische Temperaturen, etc.) zu ermitteln und zu quantifizieren. Dazu werden diese Daten durch ein umfangreiches VisualBasic-Skript mit den entsprechenden Energiedaten des gleichen Zeitraums kombiniert und gleichzeitig monatliche, quartalsweise und jährliche Daten kombiniert. Die resultierenden Excel-Dateien bilden die Grundlage zur weiteren Verarbeitung in MATLAB.

In MATLAB werden zunächst Produktions- und Energiedaten getrennt vorverarbeitet und der Energieverbrauch um den Grundverbrauch des Ofens zum Ausgleich der Wärmeverluste bereinigt. Anschließend werden die markanten Energiespitzen, welche beim Aufheizen und Abkühlen des Glases auftreten, identifiziert. In den Produktionsdaten werden zunächst die Gläser sortiert und ggf. zusammengefasst. Da die Daten keine Information darüber enthalten, wie viele Glasscheiben gleichzeitig im Ofen prozessiert werden und oftmals mehrere Scheiben gleiche Zeitstempel aufweisen, wird diese Zahl anhand der Glasfläche ermittelt und Gläser entsprechend zu einzelnen Batches zusammengefasst. Die Zeitstempel der Energie-Peaks können anschließend den Zeitstempeln der Ofenbatches zugeordnet werden. Ungültige Daten (Energie- oder andere Parameter sowie Zeiten außerhalb von Grenzwerten) werden erkannt und verworfen. Sowohl die zeitliche Streuung als auch die fehlenden Daten zu den Batchgrößen werden vom MATLAB-Skript durch einen umfassenden Plausibilitätscheck kompensiert und aussortiert. Damit soll eine genaue Zuordnung der Produktionsdaten (Heizbetrieb des Ofens beim Tempern der Scheiben) und der korrespondierenden Energiedaten ermöglicht werden.

Zusätzlich wird eine sogenannte Standby-Untersuchung durchgeführt, bei welcher der Standby-Energieverbrauch des Ofens bestimmt wird. Diese Werte sind für das Modell von Bedeutung, um auch den Energiebedarf bei Aufheizen des Ofens auf Betriebstemperatur und im Standby-Betrieb richtig abzubilden und eine Optimierung des Ofenbetriebs zu ermöglichen.

Als Resultat der Datenanalyse stehen für das Simulationsmodell der Arbeitsstation die für jeden Produkttyp notwendigen Prozessparameter zur Verfügung. Für den im Projekt untersuchten Beispielprozess sind dies die folgenden Parameter:

- Rezeptparameter (Temperaturen und Zeiten) für den jeweiligen Glastyp und die Dimension
- Energieeinsatz für Aufheizung und Abkühlung des Glases
- Energiebedarfe und Zeiten zur Vorbereitung des Ofens sowie im Standby

Diese Parameter werden in Tabellen bzw. den zugehörigen Dateien abgelegt und können vom Simulationsmodell später direkt gelesen werden.

3 Modellbildung

Das Simulationsmodell liefert die Daten, mit denen sich der Energie- und Zeitbedarf für die Produktion einer Abfolge von Fertigungsaufträgen simulieren und folglich optimieren lässt. Im Einzelnen sind diese Daten die Produktparameter, wie eingesetzte Energien sowie relevante Zeiten und Anlagenzustände.

Da das Modell in einer Optimierungsumgebung eingesetzt werden soll, ist eine hohe Performance unabdingbar. Gleichzeitig sollte sichergestellt werden, dass das Prozessmodell mit etablierten Tools entwickelt werden kann und eine standardisierte Schnittstelle aufweist, über die es vom Optimierungsmodul aufgerufen wird. Um dies zu ermöglichen wird auf die Simulationssprache Modelica zurückgegriffen und das Modell mit dieser Sprache mit dem Simulationstool SimulationX (SimulationX, 2016) entwickelt.

3.1 Struktur des Ofenmodells

Das Ofenmodell im Speziellen beziehungsweise das Prozessmodell im Allgemeinen können je nach Informationslage mit verschiedenen Paradigmen entwickelt werden. In einem WhiteBox-Ansatz werden detaillierte physikalische Gleichungen aufgestellt, welche das Verhalten des Prozesses sehr genau wiedergeben. Diese Modellierungsweise bietet den Vorteil, dass das Modell für alle Bedingungen gilt. Es ist jedoch zum einen aufwendig in der Erstellung und zum anderen auch sehr rechenzeitintensiv.

Ein weiterer Ansatz ist die GreyBox-Methode, bei der grundlegende physikalische Zusammenhänge in Gleichungsform beschrieben werden, jedoch die Parametrierung über ein Anlernen mit Messdaten erfolgt, sodass die resultierenden Parameter keiner real vorhandenen Eigenschaft des Systems entsprechen müssen. Der Abstraktionsgrad des Modells ist größer, die Genauigkeit geringer und die Gültigkeit des Modells auf den Bereich, aus dem Messdaten vorliegen, beschränkt.

Als dritter Ansatz, welcher auch im Projekt verfolgt wird, ist der BlackBox-Ansatz zu nennen. Dabei werden Messdaten direkt zum Training des Modells bzw. im Modell selbst verwendet, sodass einerseits die Information über die physikalische Funktion des Prozesses nicht bekannt sein muss, andererseits jedoch die Messdaten alle benötigten Bedingungen umfassen müssen. Nicht durch Daten abgedeckte Betriebszustände führen dabei zu falschen Ergebnissen.

Das entwickelte Ofenmodell verfügt über keine Eingänge, jedoch über verschiedene Parameter und Ausgänge. Parameter sind dabei Glastyp, Dimension und Anzahl sowie der Ofenzustand. Ausgangsvariablen sind Zeiten (Prozesszeit, Gesamtzeit, Wartezeit), Energiedaten (Aufheizen, Prozessieren, Abkühlen, Warten) sowie die Ofentemperatur bei Prozessende.

Der Aufbau des Modells besteht im Wesentlichen aus zwei Komponenten: zum einen einer Blockstruktur (vgl. Abb. 2), über welche die jeweiligen Prozessdaten aus den hinterlegten Tabellen gewonnen und verarbeitet werden, und zum anderen aus einem Zustandsdiagramm (vgl. Abb. 3), mit dem die verschiedenen Betriebszustände des Ofens modelliert sind. Diese umfassen neun Zustände (Initial, Standby, Vorbereitung Heizung, Vorbereitung Kühlen, Bereit, Prozessheizen, Prozesskühlen, Beendet, Gestoppt), welche während der Simulation in Abhängigkeit von zeit- und temperaturgesteuerten Transitionen durchlaufen werden. Je nach Betriebszustand

werden dann die entsprechenden Heiz- und Kühlleistungen und Temperaturen in der Blockstruktur parametrisiert und verarbeitet. Das Zustandsdiagramm wird grafisch erstellt und durch eine automatische Codegenerierung in Modelica-Code umgewandelt (Seidel und Donath 2011).

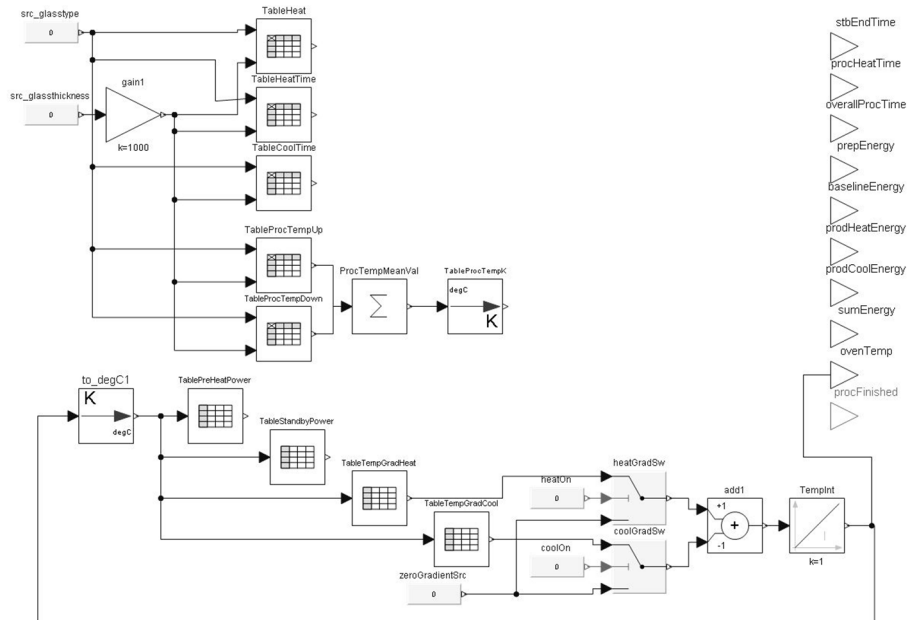


Abbildung 2: Blockstruktur des Ofenmodells (Screenshot aus SimulationX)

Das Modell wird durch den Vergleich der Simulationsergebnisse mit den gemessenen Werten validiert. Da das Modell als BlackBox-Modell jedoch auf den Messdaten basiert, ist diese Validierung als Funktionstest zu sehen. Gleichzeitig wird die Performance des Modells evaluiert, da es beim Einsatz in der Optimierungstoolchain sehr schnell ausgeführt werden muss.

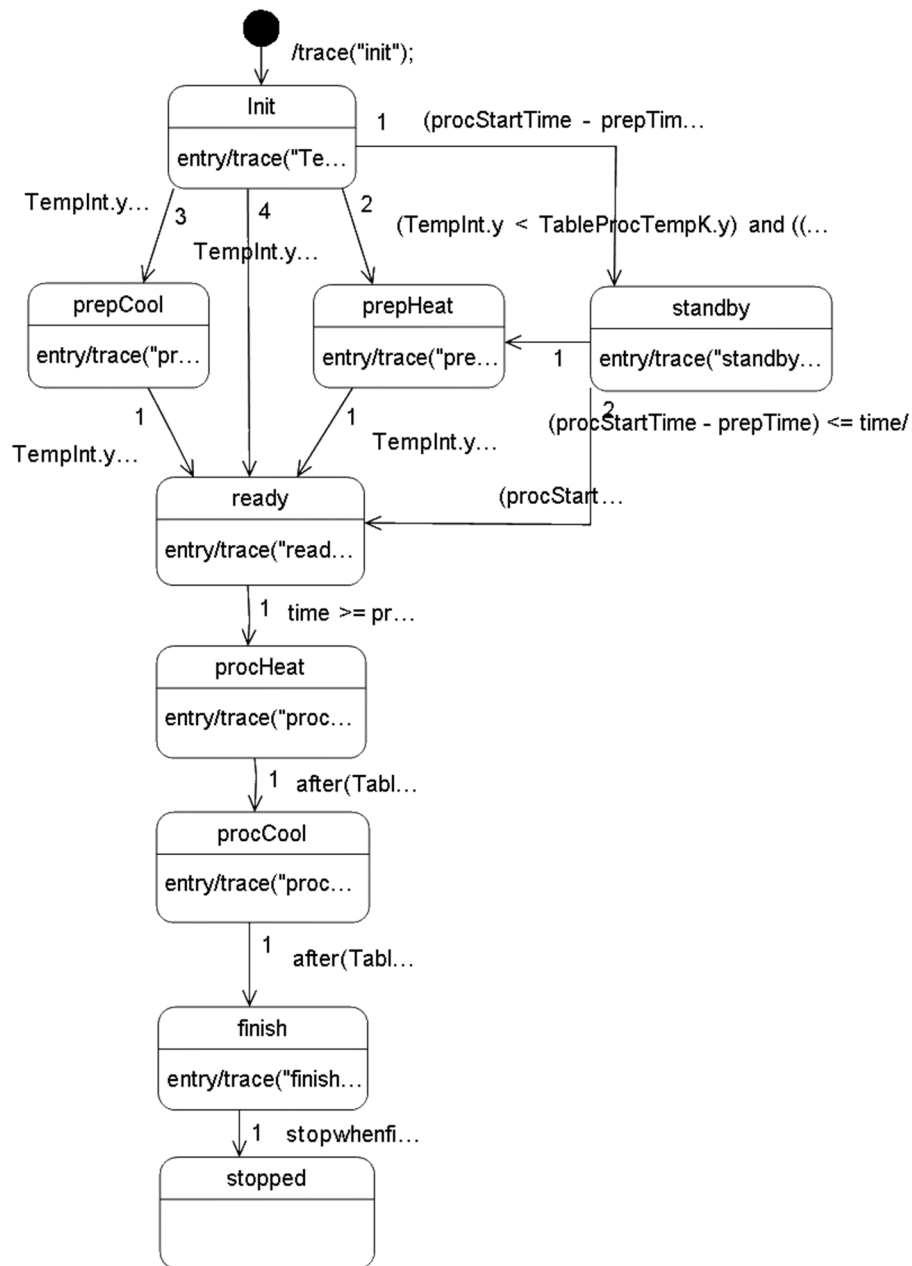


Abbildung 3: Zustandsdiagramm des Ofenmodells

3.2 Export des Modells als Functional Mockup Unit

Als nächster wichtiger Schritt nach der Modellerstellung ist der Modellexport als Functional Mockup Unit (FMU) (Blochwitz et al. 2012) zu sehen. Viele Modelica-Simulationswerkzeuge ermöglichen es, Modelle in einem einheitlichen Format als

FMU zu exportieren und auch zu importieren. Über das Functional Mockup Interface (FMI) (Functional Mock-up Interface 2014), welches ebenfalls standardisiert ist, kann das FMU aufgerufen und ausgeführt werden. Teilmodelle können damit als FMU in ein Gesamtmodell integriert und gemeinsam simuliert werden. FMU werden zum Modellaustausch zwischen verschiedenen Tools, Domänen und Anwendern verwendet, daneben ist jedoch auch Know-how-Schutz und Kapselbarkeit ein wichtiger Aspekt für die Verwendung von FMU. Da das FMU alle Elemente und Funktionen des Originalmodells enthält, entspricht es diesem 1:1 und die Simulationsergebnisse sind identisch. Um das Ofenmodell als FMU auszuführen, ist im Optimierungsmodul die Integration des FMI notwendig, über welches das FMU ausgeführt wird.

Das Ofenmodell verfügt über keinen Speicher, mit welchem der Ofenzustand von einem Simulationsdurchlauf zum nächsten gespeichert werden könnte. Das ist jedoch auch nicht notwendig, da durch den Optimierer vor jedem Simulationslauf das Modell mit den entsprechenden Parametern initialisiert wird. Die im Projekt realisierte Optimierungstoolchain ist in Abbildung 4 dargestellt.

4 Optimierung

Die vom Simulationsmodell berechneten Daten werden genutzt, um den untersuchten Temperprozess, inklusive der vom Ofen und der Gebläsekammer benötigten elektrischen Energie, vollständig in einem APS-System (Advanced Planning and Scheduling) abzubilden. Ziel des Projektes OptPlanEnergie ist eine Optimierung der Auftragsreihenfolge in Bezug auf den Energieverbrauch, ohne dabei andere, durch den Produktionsprozess vorgegebene, Restriktionen zu vernachlässigen.

Die Auftragsreihenfolge beeinflusst den Energieverbrauch der Temperanlage in zweierlei Hinsicht:

1. Werden zwei Aufträge hintereinander gefahren, die unterschiedliche Ofentemperaturen benötigen, muss der Ofen entsprechend abgekühlt bzw. aufgeheizt werden. Eine Gruppierung der Aufträge, die möglichst wenige Temperaturwechsel induziert, reduziert also den Energiebedarf der Anlage.
2. Die einzelnen Scheiben werden zunächst von einem Mitarbeiter auf dem Aufлагetisch vor der Ofenkammer platziert. Dann werden sie per Barcodescanner im Produktionsleitsystem erfasst, ausgerichtet, geprüft und mit einem Produktionsstempel versehen. Anschließend wird am Leitreechner das entsprechende Rezept gewählt. Dieser Rüstprozess findet statt, während sich der vorherige Auftrag in der Ofenkammer befindet. Dauert dieser Rüstvorgang länger als der Fertigungsvorgang des vorhergehenden Auftrages, entsteht eine Wartezeit, in der der Ofen auf Temperatur gehalten werden muss, was den Energiebedarf des Gesamtprozesses erhöht.

Im APS-Modell des Temperprozesses werden dementsprechend mengenabhängige sowie mengenunabhängige Rüstzeiten, die Überlappung der Fertigungsaufträge und die durch Rezeptwechsel bedingten Aufheiz- und Abkühlzeiten berücksichtigt.

Um die vom Ofenmodell benötigten Eingabedaten und die berechneten Energiebedarfe sowie den Ofenzustand bei der Berechnung der Ofenbelegung berücksichtigen zu können, wird das APS-System so erweitert, dass beliebige nicht-native Modellobjekte gespeichert und im Planungsablauf verwendet werden können. Des

Weiteren wird die Software um eine externe Schnittstelle ergänzt, mit der an vordefinierten Punkten während der Feinplanung Daten mit problemspezifischen externen Modulen ausgetauscht werden können. Im untersuchten Szenario werden während der Rüstoptimierung der aktuelle Ofenzustand, die Planungsdaten des zuletzt geplanten Auftrages und die Menge der Kandidaten mit ihren Grobplanungswerten (z. B. frühester möglicher Start) an ein externes Optimierungsmodul übermittelt, wie in Abbildung 4 dargestellt.

Das Optimierungsmodul bestimmt die Kosten für mögliche Auftragssequenzen, wobei zur Bestimmung der Energiebedarfe und der damit verbundenen Kosten das Ofenmodell per FMI mit den entsprechenden Startwerten aufgerufen wird. Da, je nach Wahl des Verfahrens, eine große Zahl von Auftragssequenzen simuliert werden muss, ist eine möglichst kurze Antwortzeit des Ofenmodells für die praktische Einsetzbarkeit des untersuchten Ansatzes von entscheidender Bedeutung.

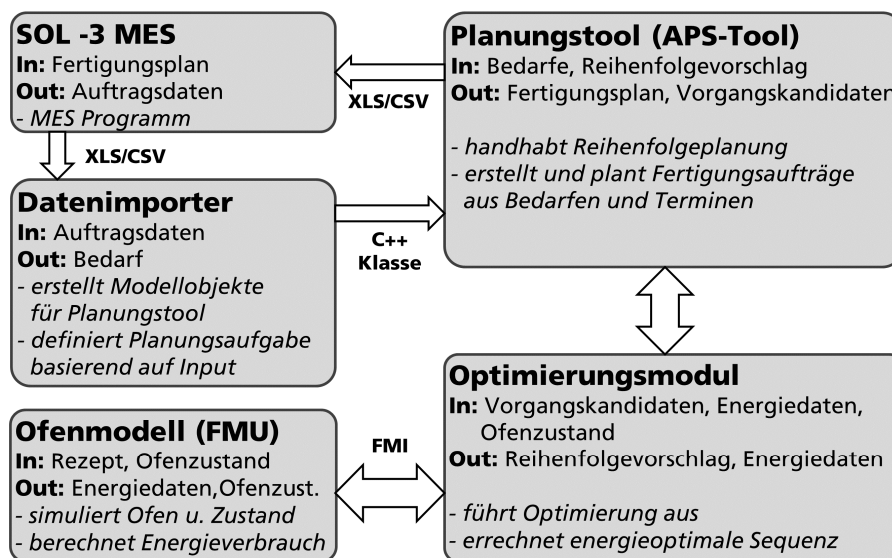


Abbildung 4: Schematische Darstellung des Datenaustauschs zwischen den Modulen der APS-Toolchain

Die berechneten Energiewerte können grafisch und in Form tabellarischer Reports dargestellt werden, sodass auf ihrer Grundlage Lastspitzen erkannt und Energiefahrpläne erstellt werden können.

Die vorgestellte Erweiterung des APS-Systems um die Berücksichtigung des Energiebedarfes der abgebildeten Fertigungsprozesse ermöglicht somit dem Planer eine gezielte Reduktion des Energiebedarfs und der damit verbundenen Kosten des Produktionsprozesses.

Danksagung

Das Forschungsprojekt OptPlanEnergie – Optimierungsplattform für die energieeffiziente Fertigung – wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 03ET1162A/B/C gefördert.

Literatur

- Baumann, F.; Wilson, H.; Seidel, S.; Franke, M.; Gromnitzer, U.: OptPlanEnergie - an optimization and scheduling platform for the energy-efficient production of tempered glass. In: T. Wiedemann (Hrsg.): ASIM 2016, Dresden, 2016, S. 121–124.
- Blochitz, T.; Otter, M.; Akesson, J.; Arnold, M.; Clauß, C.; Elmquist, H.; Friedrich, M.; Junghans, A.; Mauss, J.; Neumerkel, D.; Olsson, H.; Viel, A.: Functional mockup interface 2.0. Book of abstracts. 9th International Modelica Conference, München, 2012, S. 173.
- Functional Mock-up Interface. <http://www.fmi-standard.org>. Letzter Zugriff am 13.03.2017.
- Seidel, S.; Donath, U.: Error-free Control Programs by means of Graphical Program Design, Simulation-based Verification and Automatic Code Generation. In: Clauß, C. (Hrsg.): Proceedings of the 8th International Modelica Conference, Technische Universität, Dresden. Linköping: University Electronic Press 2011, S. 628–637.
- SimulationX:ESI ITI GmbH, <http://www.SimulationX.de>. Letzter Zugriff am 20.03.2017.