

Energieeffizienz durch optimierte Abstimmung zwischen Produktion und technischer Gebäudeausrüstung

Energy Efficiency by Optimised Adjustment between Production and Building Services

Lars Martin, Jens Hesselbach,
Institut für Produktionstechnik und Logistik, Universität Kassel
Sebastian Thiede, Christoph Herrmann,
Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik, TU Braunschweig
Bruno Lüdemann, Rüdiger Detzer,
Imtech Deutschland GmbH & Co. KG, Hamburg

Abstract: For companies energy consumption gets more and more important whereas the use of energy incorporates both a strong ecological as well as economical dimension. This is specifically true for companies which need complex technical building services with high energy consumption to provide defined production environments and auxiliary media. Thereby it is crucial to have a holistic view on the whole system including the strong interdependencies of production equipment and technical building services to derive proposing measures and find global optima. Against this background this paper presents an integrated approach which basically enfolds the coupling of different simulation tools for technical building services, building climate, production machines / material flow and production management. This enables to consciously consider the complex and dynamic interactions within the system. Thereby the approach supports the design and management of production facilities and technical building services to foster energy efficiency in industry.

1 Einleitung

Nach einer Umfrage der Deutschen Energieagentur halten 97% der befragten Unternehmen das Thema Energieeffizienz und Energiekostenreduzierung für wichtig (Emnid 2005). Neben den bisherigen primären Zielen der Fabrikplanung, Bestandsoptimierung, Materialflussoptimierung, Optimierung der Kapazitätsauslastung, etc. wird die Planung und Reduzierung des Energieverbrauchs eine zunehmend wichtigere Rolle spielen.

Genau wie im Bereich der Materialfluss- und Kapazitätsplanung werden auch im Bereich der Energieversorgung, der Klimatisierung und der Hilfsmedien (Dampf, Druckluft, Kühlwasser, etc.) die zukünftigen Energiekosten der Fabrik bereits in der Planungsphase entscheidend bestimmt. Planungsfehler aufgrund von falschen oder unzureichenden Daten führen im Serienbetrieb zu hohen Kosten, die sich zum Teil nur mit großem Aufwand korrigieren lassen. Vorhandene Energieeffizienz-Potenziale werden gegenwärtig im Planungsprozess nur unzureichend erkannt bzw. genutzt (Müller 2008).

Die exakte Bestimmung der Energieverbräuche sowie der thermischen Emissionen in der Planungsphase stellt somit einen entscheidenden Planungsfaktor dar.

Effizienzpotenziale zur Senkung des Energiebedarfs und einhergehend damit der Energiekosten bestehen desweiteren in der Betriebsphase der Produktion. Sowohl in der Reihenfolgeoptimierung des Produktionsprogramms als auch in der energetisch optimierten Eintaktung der Maschinen sind Potenziale zur Kostensenkung erkennbar (Junge 2007).

2 Produktion und Gebäudetechnik

In den einzelnen Teilbereichen der Planung von Produktionsstätten: Produktionsplanung, technische Gebäudeausrüstung, Klimatisierung sowie Energie- und Medienbereitstellung kommen heutzutage Simulationsprogramme zur Anwendung. Bereits 2004 machte Zimmermann als Obmann der VDI-Richtlinienausschüsse 6020 (Gebäudesimulation) und VDI 2078 (Kühllastregeln) klar, dass sich die Aufgabenstellung bei der Planung von Gebäuden und Anlagen in den letzten Jahren grundlegend gewandelt hat. „Es geht immer mehr darum, so wenig Anlagentechnik als möglich mit einem Minimum an Energieverbrauch zu realisieren. Dies macht es unerlässlich, gebäudetechnische Anlagen so genau wie möglich zu dimensionieren und ihren Energieverbrauch im Voraus zu berechnen.“ (Zimmermann 2003).

Für die unterschiedlichen Bereiche wie Klimatechnik, Druckluft-, Kühl- und Kaltwasser- oder Dampferzeugung wurden Simulationsprogramme entwickelt, die eine genaue Vorhersage der einzusetzenden Endenergie für die Medienbereitstellung ermöglichen. Nach der VDI 6020 wird hierbei zwischen der Thermisch-energetischen Gebäudesimulation und der Thermisch-energetischen Anlagensimulation unterschieden (VDI 2001).

Im Bereich der Wohn- und Bürogebäude werden Thermisch-energetische Gebäude- und Anlagensimulationen bereits eingesetzt. Für komplexe Fertigungsstätten der produzierenden Industrie ist die Simulation ungleich schwerer, aufgrund von schwer bestimmbar inneren Lasten und Abhängigkeiten zwischen Produktionsanlagen und Energiebereitstellung (Lüdemann 2005).

Problematisch ist hierbei die Vorhersage des Bedarfs an den unterschiedlichen Medien. Die bislang übliche Praxis, über z. B. Gleichzeitigkeitsfaktoren den Bedarf zu ermitteln, stellt keine ausreichend genaue Planungsgrundlage für komplexe Anlagen mit einer hohen Anzahl an Energieträgern und Wärmeverbundsystemen dar. Hier kommt es auf eine zeitliche Auflösung der Energieströme an, um einen hohen Wirkungsgrad der Anlage zu erreichen.

Die zeitliche und exakte Bestimmung der benötigten Energiemengen sind entscheidend. An diesem Punkt setzt diese Arbeit an, indem die Materialflusssimulation die zeitlich aufgelösten Energie- und Medienprofile liefert. Aufbauend auf ersten bereits durchgeführten Studien von Junge (2007) wird die Materialflusssimulation um Informationen zu Energie- und Medienbedarf sowie Wärmelasten erweitert.

Durch Datenaustausch der einzelnen Programme untereinander werden die Wechselwirkungen der einzelnen Bereiche auf die jeweils anderen berücksichtigt und zu einer Gesamtbilanz des Systems zusammengeführt.

Die Auswirkungen von unterschiedlichen Produktionsprogrammen auf die Wärmeemissionen und den Energie- und Medienverbrauch der Anlagen können somit simulativ bestimmt werden und direkt oder indirekt an die Simulationsprogramme zur Auslegung der Gebäudetechnik und der Lüftungs- und Klimaanlage übermittelt werden. Dies erlaubt es dem Planer bereits in einer frühen Phase der Planung die gesamte Anlage bestehend aus Produktion, Energie- und Medienbereitstellung, Gebäudehülle sowie Klima- und Lüftungstechnik genauer auszulegen.

Variantsimulationen, in denen verschiedene Produktionsvarianten mit unterschiedlichen Steuerungsstrategien betrachtet werden oder in denen unterschiedliche Wärme- und Kälteerzeuger zum Einsatz kommen, erlauben es, eine ganzheitliche effiziente Produktion mit dem Ziel minimaler Kosten zu planen.

Neben der Erhöhung der Planungsgenauigkeit eröffnet sich die Möglichkeit, verschiedene Strategien in der Energiebereitstellung oder Steuerung der energietechnischen Anlagen zu erproben. Greifen zum Beispiel Notfallstrategien bei Ausfall von einzelnen Druckluftkompressoren? Welche Produktionsanlagen können mit einem Minimum an Produktionsausfall abgeschaltet werden? Durch mangelnde Medienversorgung hervorgerufene Störungen lassen somit detaillierte Rückschlüsse auf die Produktion zu.

3 Technische Umsetzung

Abbildung 1 zeigt das Zusammenspiel der verschiedenen Teilbereiche. Die um Energie- und Medieninformation erweiterte Materialflusssimulation erzeugt zeitlich aufgelöste Bedarfs- und Emissionsprofile für den Energie- und Medienbedarf. Diese Informationen werden über eine Schnittstelle an die angegliederten Programme verteilt.

Dabei werden nur die Informationen an die einzelnen Programme weitergeleitet, die diese zur Berechnung benötigen. So werden z. B. Informationen zur inneren Wärmelast, die aus der Materialflusssimulation kommen, an die thermische Gebäudesimulation weitergeleitet. Informationen zu benötigtem Kühlwasser, Heizwasser, Druckluft, elektrischem Strom, etc. werden an das Simulationsprogramm für die Wärme- und Kältebilanzierung verteilt.

Innerhalb der Verbundsimulation werden Steuerungsstrategien hinterlegt, die entscheiden, welche Maßnahmen zu ergreifen sind, wenn bestimmte Ereignisse eintreten oder Grenzwerte überschritten werden.

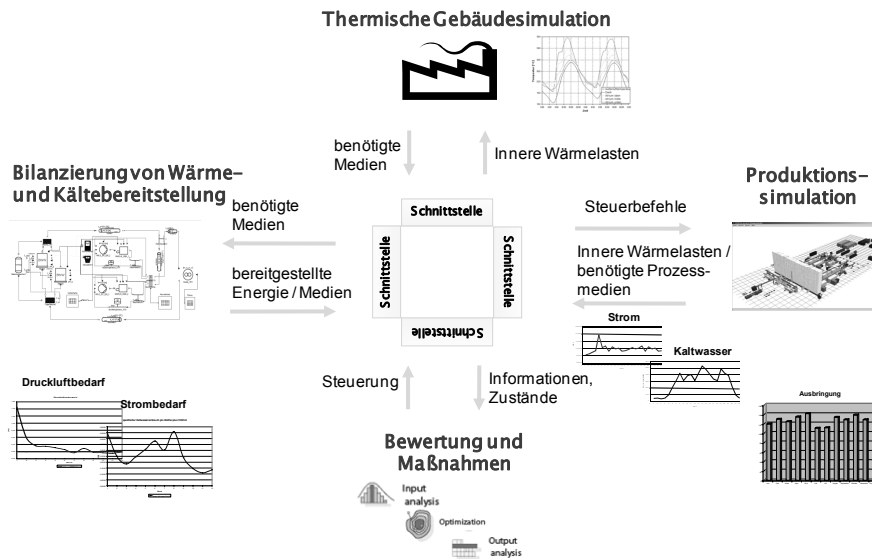


Abbildung 1: Verbundsimulation

Ein mögliches Szenario wäre zum Beispiel für die Kaltwasserbereitstellung:

Die angeforderte Leistung an Kaltwasser für die Produktion und Hallenklimatisierung kann zum definierten Zeitpunkt nicht bereitgestellt werden. Ohne besondere Strategie würde diese Information zur Materialflusssimulation weitergeleitet und würde dort zur Störung einzelner Maschinen führen. Weitere Strategien, die mit Hilfe der Verbundsimulation analysiert werden können, wäre z. B. das Herunterfahren der Hallenklimatisierung. Sollte der Zustand länger anhalten, würde die Temperatur im Produktionsbereich soweit ansteigen, dass Störungen aufgrund der zu hohen Umgebungstemperatur an den Maschinen auftreten.

Die Verbundsimulation berücksichtigt diese Effekte und sendet die entsprechenden Steuersignale an die Materialflusssimulation. So lassen sich unterschiedliche Steuerungsstrategien erproben und deren Auftretswahrscheinlichkeit ermitteln.

Als umfassendes Ergebnis liefert die Simulation sowohl Kennzahlen zur Produktion (Ausbringung, Auslastung, Durchlaufzeit) als auch Informationen zu benötigten Energien und Medien (Strom, Druckluft, Kaltwasser, Dampf). Darüberhinaus lassen sich die Kosten für die Erzeugung dieser Medien ermitteln.

Ausgehend von den vorhandenen Programmen sind für die Umsetzung der Verbundsimulation folgende Schritte notwendig:

- Erweiterung der Materialflusssimulation um Informationen zum Energie- und Medienbedarf, Wärmeemissionen, Wärmerückführung
- Erzeugung von zeitlich aufgelösten Bedarfsprofilen
- Kopplung der Simulationsprogramme
- Erstellung von Steuerungsstrategien zur Optimierung der Produktion *und* des Energiebedarfs

Für die bislang gebräuchlichen Materialflusssimulatoren werden Verfahren entwickelt, die den Energiebedarf der Anlagen abbilden. Ziel ist eine plattformunabhängige Lösung, die eine Anbindung an beliebige Materialflusssimulatoren ermöglicht. Hierfür kann auf die prototypisch entwickelten Module von Junge zurückgegriffen werden. Die Module zur Berechnung der Energie- und Medienbedarfe erlauben aufgrund ihrer offenen Struktur als Dynamic Link Library (DLL) eine Bereitstellung ihrer Funktionalität für fast alle Materialflusssimulatoren. Die Materialflusssimulationssoftware ermittelt die Zustände, z. B. Bearbeitungsbeginn und Ende, Pausenzeiten, etc., der einzelnen Anlagen und leitet diese Informationen an das Berechnungsmodul weiter. Das Modul wertet die Informationen mit den hinterlegten Energiedaten aus und berechnet diese zu einem Gesamtverbrauch der Produktionsstätte.

Ziel ist die Erzeugung von zeitabhängigen Profilen des Prozesskälte- und Wärmebedarfes als Lastprofile für die energetischen Anlagensimulationen, um den Einfluss des Produktionsprozesses realitätsnah abzubilden.

Diese Informationen werden über eine zu definierende Schnittstelle an die Programme zur thermischen Gebäudesimulation sowie zur Berechnung der Energie- und Medienbereitstellung weitergeleitet.

Bei der Auswahl der Kopplung muss unterschieden werden, welche Ziele die Verbundsimulation erfüllen soll. Mögliche Kopplungsvarianten sind:

- Offline: Getrennte Simulation von Produktion und Energie- / Medienbereitstellung
- Online: Mehrfach sequentiell ablaufende Simulation von Produktion und Energie- und Medienbereitstellung

Die Offline-Kopplung erfolgt bei der Ermittlung von Energiebedarfen zur Grobauslegung der Produktionsstätte. Hierbei erzeugt die Materialflusssimulation während der Laufzeit die zeitlich aufgelösten Energie- und Medienbedarfe und übergibt nach Abschluss der Simulation die Daten an die anderen Simulationsprogramme, die diese Information als Eingangsdaten zur Berechnung von Heiz-, Kühl-Bedarfen und weitere Energien wie Strom, Gas etc. benutzen. Der Vorteil der Simulation gegenüber der bisher üblichen Praxis, auf Erfahrungswerte und geschätzte Lastgangkurven für diese Medien zurückzugreifen, liegt in der höheren Genauigkeit dieser Kurven.

Abhängigkeiten des Energieverlaufs von Produktionsprogrammen können genauso ermittelt werden wie der Einfluss von Störungen auf den Energiebedarf.

Der Datenaustausch kann hierbei über einfache Dateimechanismen erfolgen.

Um Optimierungspotenziale hinsichtlich des Energiebedarfs aufzuzeigen reicht die Offline-Kopplung nicht aus. Erst durch die Rückkopplung der Gebäude- und Medienbereitstellung auf die Produktion lassen sich Strategien für eine produktive und energetisch optimierte Produktion erarbeiten. Hierzu müssen die Simulationsprogramme während ihrer Laufzeit miteinander gekoppelt werden. Aus jetzigem Forschungsstand erscheint es sinnvoll, eine Online Kopplung zu implementieren. Die Einflussfaktoren auf die Verbundsimulation sind auf der einen Seite durch die Materialflusssimulation erzeugten Energiebedarfe, auf der anderen Seite durch die äußeren Faktoren der thermischen Gebäudesimulation wie Außentemperatur, Sonneneinstrahlung, Wind, etc. vorgegeben. Auf der Seite der Energiebereitstellung

sind keine Einflussfaktoren vorhanden die unabhängig von den anderen Simulatoren auftreten können. Die blockierende Kopplung, bei der die verschiedenen Simulationsprogramme auf die Ergebnisse der Partner warten, bietet eine ausreichende Genauigkeit bei vertretbarem Aufwand der Implementierung.

Ein Datenaustausch zwischen den Programmen wird in der Regel von der Materialflusssimulation initiiert, entweder durch Erreichen von vorher definierten Grenzwerten für einzelne Medien oder in festen Zeitabständen. Die Grenzwerte sollten durch die Anlagentechnik auf Seite der Energie- und Medienbereitstellung definiert werden.

Um die Einflussfaktoren wie Temperatur und Sonneneinstrahlung auf die thermische Gebäudesimulation hinreichend genau abzubilden, findet zusätzlich ein Austausch der Daten in festen Zeitabständen statt. Die VDI 6020 gibt als Richtlinie eine stundenweise Neuberechnung der thermischen Gebäudesimulation vor. Aufgrund der Trägheit der Gebäudehülle stellt dieser Wert einen guten Ausgangswert dar, der bei Bedarf angepasst werden kann. Der Datenaustausch zwischen Materialflusssimulation und thermischer Gebäudesimulation kann somit im gleichen Intervall erfolgen wie die Neuberechnung der thermischen Gebäudesimulation.

Die Festlegung der Übertragungsintervalle muss genauso wie die Festlegung der Detaillierungsstufe oder der Auswertintervalle von dem jeweilig zu untersuchenden System und der Aufgabenstellung abhängig gemacht werden.

Der zeitliche Ablauf des Datenaustauschs ist in Abbildung 2 dargestellt. Die Energie- und Medieninformationen aus der erweiterten Materialflusssimulation werden an den Verteiler übergeben, welcher die Informationen an die Gebäudesimulation und die Thermisch-energetische Anlagensimulation übergibt. Die Gebäudesimulation ermittelt die zur Klimatisierung benötigte Energie und gibt das Ergebnis an den Verteiler zurück, welcher die Informationen zusammen mit den bereits erhaltenen Informationen an die Thermische-energetische Anlagensimulation weitermeldet.

Das Ergebnis der energetischen Anlagensimulation kann aus der benötigten Menge an Endenergie, Informationen zu bereitgestellten Energiemengen oder Fehlermeldungen bestehen.

Die Informationen werden über den Verteiler an die angebundenen Programme weitergeleitet.

4 Fallbeispiel

Die Arbeit gliedert sich in das Forschungsprojekt „Energieeffizienz durch optimierte Abstimmung zwischen Produktion und TGA“ (ENOPA) ein, welches durch das Bundeswirtschaftsministerium gefördert wird (Fördernummer: 0327422). Im Forschungsverbund sind die Industrieunternehmen B. Braun Melsungen AG und die Weibler Confiserie Chocolaterie GmbH als produzierende Unternehmen vertreten. Die Produktionsstätte der B. Braun Melsungen AG produziert Infusionslösungen für den medizinischen Bedarf. Die Firma Weibler stellt Schokolade her. Obwohl beide Unternehmen aus unterschiedlichen Branchen stammen, sind die Energieprofile der beiden Unternehmen ähnlich. In beiden Produktionsstätten werden hohe Energiemengen zur Beheizung und Kühlung sowohl der Produkte als auch zur Klimati-

sierung der Gebäude benötigt. Aufgrund dessen eignen sich die Unternehmen gut, um die Methodik der Verbundsimulation auf ihre Wirksamkeit zu überprüfen. Je komplexer die Anlagentechnik und je höher der Bedarf an Energien und Medien ist, desto höher ist der Nutzen einer Verbundsimulation. An der Produktionsstätte zur Herstellung von Infusionslösungen der B. Braun Melsungen AG soll dies verdeutlicht werden.

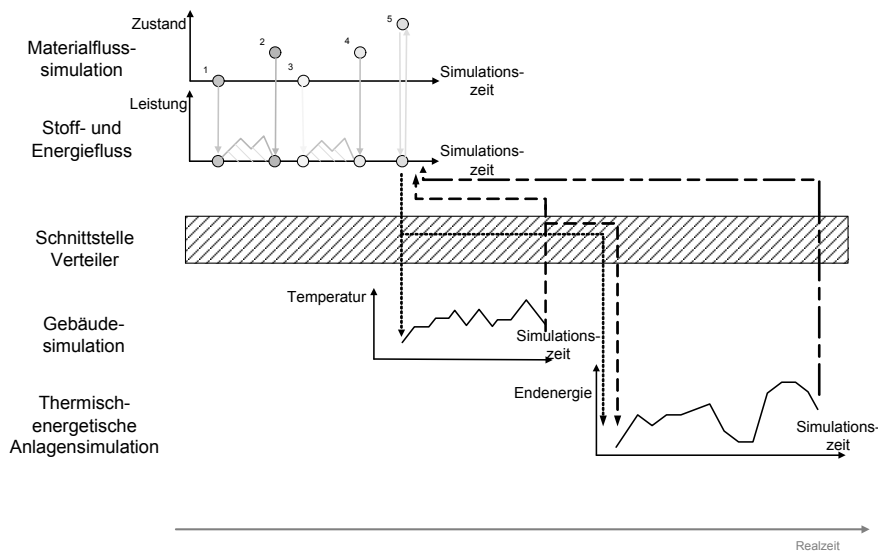


Abbildung 2: Kopplungsmechanismus

Der Produktionsprozess zur Herstellung von verschiedenen Infusionslösungen in unterschiedlichen Verpackungsgrößen findet auf mehreren Produktionslinien statt, die vom Produktionsablauf identisch sind. In Abbildung 3 ist dieser schematisch dargestellt.

- Die Abfüllung der Infusionslösung erfolgt im sogenannten Blow-Fill-Seal-Verfahren, hierbei wird Kunststoffgranulat in Extrudern durch Blasformen zu Behältnissen geformt, im gleichen Arbeitsschritt mit Infusionslösung gefüllt und versiegelt. Aufgrund der pharmazeutischen Anforderungen erfolgt der gesamte Produktionsprozess unter Reinraumbedingungen (klimatisiert, mit hohen Luftwechselzahlen). Als Prozesseingangsgrößen werden Strom, (Steril-)Druckluft, Kühlwasser, Dampf, und WFI (Wasser für Injektionszwecke) benötigt.
- Um mögliche Keime abzutöten, folgt eine Sterilisation in Autoklaven bei Überdruck mit heißem Wasser. Anschließend werden die einzelnen Gebinde abgekühlt und getrocknet. Als Prozesseingangsgrößen werden Strom, Druckluft, Kühlwasser, Dampf, und WFI sowie Warmwasser benötigt.
- Nach einer 100% Kontrolle werden die Flaschen etikettiert, in Kartons verpackt und auf Paletten zum Weitertransport gestapelt. Typische Energieträger sind hierbei Strom und Druckluft.

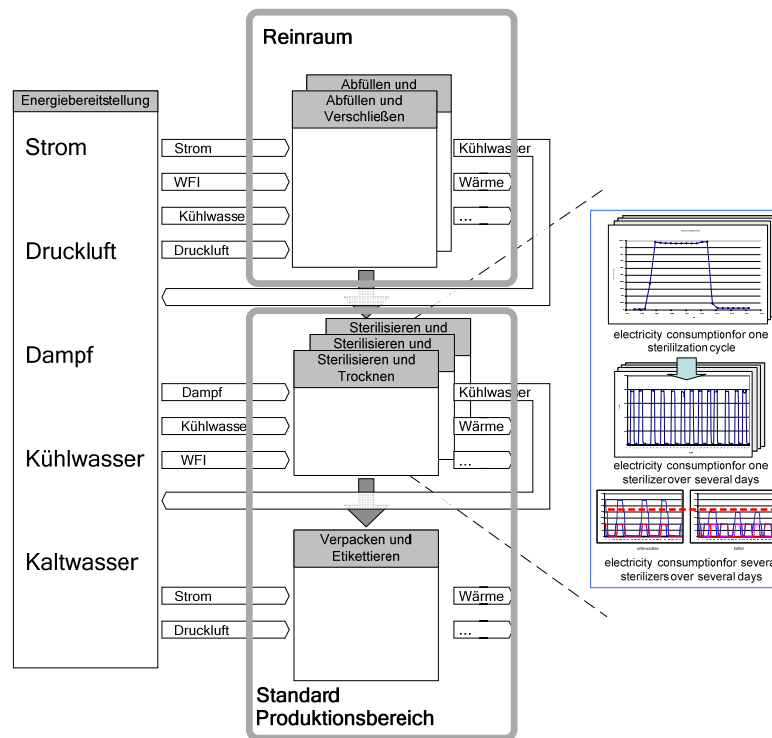


Abbildung 3: Fallbeispiel Pharmaproduktion

Jeder Bearbeitungsschritt besteht aus mehreren Maschinen, die eine Vielzahl an Energie und Medien benötigen und sowohl Emissionen in Form von Wärme an die Halle abgeben als auch über Kühlkreisläufe potenziell nutzbare Energie bereitstellen. Die Wärmeabgabe an die Halle ist ein entscheidender Faktor für die Auslegung der Klimatisierungstechnik des Gebäudes und hängt von Auslastung, Produktionsablauf und Produktionsmengen ab. Hier erfolgt ein Informationsgewinn für die Auslegung durch die erweiterte Materialflusssimulation.

Bei einem komplexen Energiebereitstellungssystem mit integrierter zentraler Wärmerückgewinnung aus dem Kühlwasserkreislauf, wie sie bei der Firma B. Braun zum Einsatz kommt, hängt die Effizienz entscheidend von der richtigen Dimensionierung und Steuerung der Anlage ab. Die Anlage leitet Kühlwasser, welches eine Temperatur von über 60 °C besitzt, in Speichertanks um, um daraus Heizungs- und Brauchwasser zu speisen. Messungen haben gezeigt, dass der Wirkungsgrad der Anlage nicht den Planungswerten entspricht. Es zeigte sich, dass die Temperatur des Kühlwasserrücklaufs selten über 60 °C beträgt, da die Maschinen (Sterilisatoren) zu unterschiedlichen Zeitpunkten ihren Abkühlvorgang starten, was zu einer Vermischung mit kühlerem Wasser führt.

Hier kann die Verbundsimulation im Vorfeld dieses Phänomen aufzeigen und eine Lösung für das Problem gefunden werden.

In der jetzigen Phase kann mit der Simulation dennoch eine bessere Strategie zur Erhöhung der Energieeffizienz bei gleichbleibender Ausbringung gefunden werden, ohne in den realen Produktionsablauf einzugreifen.

Weitere Einsatzfelder für die Verbundsimulation sind die Reduzierung von Lastspitzen die durch Überlagerung mehrerer gleicher Prozessschritte entstehen. Gerade bei Prozessen mit längeren Zykluszeiten, wie sie typischerweise bei Sterilisationsvorgängen vorkommen, können durch Abstimmung der Startzeiten Lastspitzen vermieden werden.

5 Fazit

Energiekosten stellen inzwischen einen erheblichen Kostenfaktor für produzierende Unternehmen dar, insbesondere für Unternehmen die einen hohen Energieeinsatz haben und unter klimatisierten Bedingungen fertigen müssen. Der Einsatz von effizienten Energiebereitstellungs- und Rückgewinnungssystemen hängt entscheidend mit der exakten und zeitlich aufgelösten Bestimmung der benötigten Energie- und Medien zusammen. Je komplexer die Zusammenhänge zwischen Produktion und Gebäudetechnik werden, umso schwieriger ist eine exakte Auslegung der Anlagen.

Vor diesem Hintergrund zeigt der Artikel eine Möglichkeit auf, den Energie- und Medienbedarf frühzeitig in der Planungsphase detailliert und zeitlich aufgelöst zu ermitteln. Hierdurch lassen sich Produktion und Gebäudetechnik besser aufeinander abstimmen, so dass eine höhere Energieeffizienz erreicht wird. Es können Fehlplanungen vermieden und verschiedene Steuerungsstrategien der Energiebereitstellung auf den Endenergiebedarf und die Produktivität ermittelt werden.

Literatur

- Emnid (2005) Unternehmensbefragung zum Thema Energieeffizienz. Auftraggeber: deutsche Energie-Agentur GmbH. Emnid, Bielefeld
- Junge, M. (2007) Simulationsgestützte Entwicklung und Optimierung einer energieeffizienten Produktionssteuerung. Kassel University Press, Kassel
- Lüdemann, B.; Dahm, J. (2005) Dynamische Simulation zur Optimierung komplexer Anlagensysteme. BHKS-Almanach, Bundesindustrieverband Heizungs-, Klima-, Sanitärtechnik / Technische Gebäudesysteme, Bonn
- Müller, E. (2008) Herausforderungen an Systeme und Prozesse der Fabrikplanung zur energieeffizienten Produktion, Fachtagung Energieeffiziente Fabrik in der Automobil-Produktion, 29.-30. Januar 2008, München
- VDI (2001) Richtlinie 6020 Blatt 1: Anforderungen an Rechenverfahren zur Gebäude- und Anlagensimulation – Gebäudesimulation. Hrsg. Verein Deutscher Ingenieure. Beuth, Berlin
- Zimmermann, F. (2003) Gesellschaft Technische Gebäudeausrüstung – Digitale Planung in der TGA. VDI-Verlag, Düsseldorf