

# **Vergleichende Darstellung zweier Werkzeuge zur Simulation energetischer Aspekte in der Produktion**

## ***Comparison of two Tools for Energy Simulation in Production***

Bastian Prell, Hanns-Martin Strehle, Andreas Schlegel, Matthias Putz, Fraunhofer  
Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU, Chemnitz (Germany),

bastian.prell@iwu.fraunhofer.de, hanns-martin.strehle@iwu.fraunhofer.de,  
andreas.schlegel@iwu.fraunhofer.de, matthias.putz@iwu.fraunhofer.de

**Abstract:** Energy consideration has been a topic in simulation studies for production and logistics for some years now. The research focus has shifted recently from energy efficiency more to energy flexibility. Ever growing capacities of renewable energies from wind and sun lead to an increasingly volatile energy supply characterized by oversupply and undersupply situations and thus increasing numbers of periods with either very high or even negative electricity prices on the spot market. Energy will therefore be seen as a production factor with fluctuating availability and costs. This trend is reflected exemplarily in the two new developed simulation tools, the eniBRIC introduced in 2016 and the eFlex-Tool developed in 2018. Both tools extend the software Siemens Tecnomatix Plant Simulation and implement an energy model in addition to the actual material flow model in order to assess the energy consumption of production equipment, respectively systems. This paper intends to outline the differences and similarities as well as the designated areas of application for each implementation.

## **1 Motivation und Einleitung**

Die Energiewende als Übergang von der derzeitigen intensiven Energienutzung auf Basis von Kohle, Erdöl und Erdgas sowie Nuklearenergie zur nachhaltigen Energieversorgung und -nutzung zielt auf eine drastische Reduzierung der klimaschädlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen und adressiert Probleme der Endlichkeit fossiler Energieträger und Gefahren der Atomenergie. Hauptpfeiler der Energiewende sind die Energieeffizienz, d.h. der optimierte Energieeinsatz in technischen Anwendungen, die Energiesuffizienz, also die systemische Begrenzung des Energiebedarfs durch Eliminierung nicht notwendiger Verbräuche sowie die weitgehende Substitution der bisherigen Energieträger durch erneuerbare Energien. Mit dem weltweit und vor allem auch in Deutschland wachsenden Anteil erneuerbarer Energien wirkt sich deren nur

begrenzt planbare und zu beeinflussende Variabilität in der Erzeugung unmittelbar auf das Stromsystem aus. Das netzseitige Gleichgewicht zwischen Erzeugung und Nutzung elektrischer Energie verändert sich hin zu einer zunehmenden Volatilität. Der netzweiten Flexibilisierung von Verbrauch und Nachfrage kommt dadurch eine zentrale Bedeutung bei der Umsetzung der Energiewende zu: Fand bisher ein Reagieren auf diese Volatilitäten nur erzeugungsseitig statt, wird jetzt der Einbezug der energienutzenden Akteure angestrebt, um weitere ökologische und ökonomischen Potentiale zu erschließen. Eine besondere Rolle spielt dabei das produzierende Gewerbe: einerseits besitzt die Industrie mit ihrem Anteil von 30% bis 35% des Gesamtenergiebedarfs in Deutschland bzw. 29% im europäischen Durchschnitt (eurostat 2018; Statistisches Bundesamt 2018) ein beachtliches Potenzial für Nachfrageflexibilität zur Unterstützung der Energiewende, andererseits steht die Industrie vor allem in unserer exportorientierten Wirtschaft unter einem enormen Kostendruck und muss in die Lage versetzt werden, potenziell negative Auswirkungen einer immer volatileren Energiewirtschaft zu kompensieren. Mit der Unterscheidung zwischen Energieeffizienz und Energieflexibilität (Keller and Reinhart 2016) wird die Beeinflussung des Energieeinsatzes in der Produktion, ausgehend von einer Minimierung der nominalen Bedarfe und Glättung der Verlaufsprofile hin zu einer zeitlich gezielten Steuerung der Bedarfsprofile auf Basis externer Angebote erweitert.

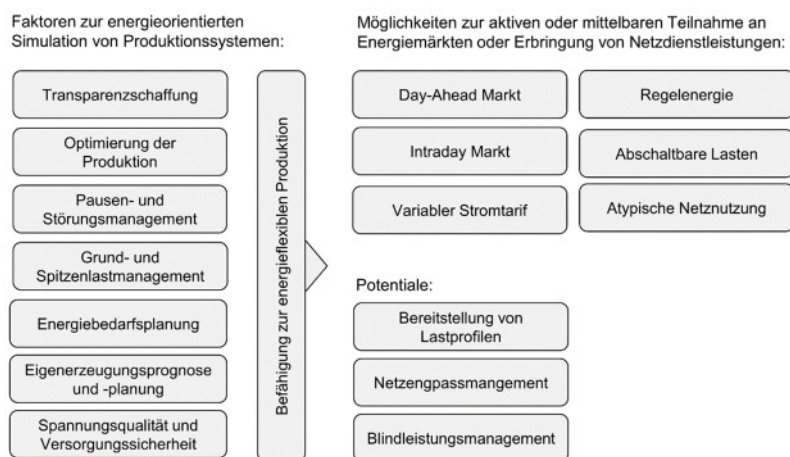
Da Produktionsprozesse dynamischen Einflüssen unterworfen sind, die sich nicht hinreichend mit statischen Verfahren abbilden lassen, ist die Simulation „ein zentrales Werkzeug zur Untersuchung auch sehr komplexer Zusammenhänge zwischen produktionslogistischen Abläufen und den peripheren Energie- und Medienversorgungssystemen in Unternehmen“ (Wenzel et al. 2017). Anwendungsgebiete sind z.B. die bedarfsgerechte Auslegung der versorgenden Infrastruktur im Sinne der Energieeffizienz oder die Identifikation von Anlagen, die prozessabhängig, z.B. bei länger andauerndem Ausbleiben von Material, in energetisch günstigere Zustände im Sinne der Energiesuffizienz geschaltet werden können. Die Autoren präsentierten in vergangenen Publikationen (Stoldt et al. 2015a, 2016) sowohl den eniBRIC Baustein als auch das neuentwickelte eFlex-Tool (Prell et al. 2018) die es ermöglichen, energetische Betrachtungen in die Materialflusssimulation einzubinden. Beide Erweiterungen für das etablierte Simulationswerkzeug Siemens Tecnomatix Plant Simulation wurden zur Untersuchung von Fragestellungen der energieeffizienten und energieflexiblen Produktion entwickelt. Der vorliegende Beitrag soll Gemeinsamkeiten und Unterschiede sowie spezifische Anwendungsgebiete der beiden Werkzeuge aufzeigen und herausstellen, welche Indikation auf die vorteilhafte Nutzung des jeweiligen Werkzeugs hinleitet.

Beide Werkzeuge bauen auf der Formulierung von Betriebszuständen auf, die mit energetischen Bedarfen verbunden sind. Diese haben elementaren Einfluss auf die Validität und Genauigkeit der energetischen Simulationsergebnisse. Daher wird in Abschnitt 4 auf die spezifischen Herausforderungen zur Erfassung und Aufbereitung energetischer Eingangsdaten für die Simulation eingegangen und dazu ein mögliches Vorgehen vorgestellt.

## 2 Einordnung bisheriger Arbeiten und Trends

Energie- und umweltpolitische Schwerpunktsetzungen und Anstrengungen sowie eine höhere Gewichtung energetischer Aspekte in der Produktion führten im letzten Jahrzehnt speziell auch zur Erforschung energiesensitiver Verfahren der Fertigungssteuerung sowie zur Entwicklung entsprechender Komponenten für Fertigungsleitsysteme. Eine solche Steuerung umfasst Produktion, Gebäude(-verbund) und Energie- bzw. Medienversorgung über die verschiedenen Leitebenen und Systeme (ERP, MES, EMS, GLT) hinweg. Für eine breite Akzeptanz im industriellen Umfeld dürfen produktionslogistische Kenngrößen mit hoher Kostenrelevanz wie Durchlaufzeiten, Bestände, Auslastung oder Termintreue nicht negativ beeinflusst werden. Generell bedingen die neuen Steuerungsverfahren und die Hinzunahme neuer, energiebezogener Zielgrößen eine wachsende Komplexität der Planung und Steuerung. Die Transparenz über das Ausmaß vorhandener Flexibilitäten und über Auswirkungen energiebezogener Steuerungsentscheidungen auf die produktionslogistischen Kenngrößen wird somit fundamental.

Qualitative Untersuchungen haben bereits gezeigt, dass Energieflexibilität durch eine Reihe von Maßnahmen im industriellen Umfeld erreicht werden kann. Welche Anwendung jedoch sinnvoll ist, hängt von vielen Faktoren ab. Eine Einteilung nach der Branche und dem Betätigungsfeld der Unternehmen bietet hier eine erste Orientierung. Wenn mit dem aktiven Demand-Side Management ein Nutzen für alle Netzteilnehmer generiert wird, so ist die Vergütung folgerichtig. Die produktionsseitigen Potentiale müssen jedoch dafür in Produkte und Angebote des Energiemarktes überführt werden. In Abbildung 1 sind die derzeitigen Möglichkeiten zur aktiven oder mittelbaren Teilnahme am Energiemarkt oder zur Erbringung von Netzdienstleistungen und deren Potentiale dargestellt.



**Abbildung 1:** Faktoren zur energieorientierten Simulation von Produktionssystemen sowie Möglichkeiten zur Teilnahme an Energiemärkten oder zur Erbringung von Netzdienstleistung

Die Berücksichtigung von energetischen Aspekten bei der Simulation von Produktions- und Logistiksystemen wird seit knapp zehn Jahren in der Wissenschaft diskutiert (Wenzel et al. 2017). Kommerzielle Systeme haben energetische Einflussfaktoren eingangs kaum berücksichtigt und umfassen sie selbst heute standardmäßig oft nur unvollständig (Thiede et al. 2013). Zahlreiche akademisch geprägte Ansätze wie z.B. von Rager (2008), Haag (2013) oder Spreng et al. (2013) versuchen, diese Lücke zu schließen. Thiede (2012) zeigt die Möglichkeit auf, die Steigerung der Energieeffizienz in der Fertigung mit Hilfe von Simulation abzusichern und entwickelt ein generisches Konzept, Fertigungssysteme energieflussorientiert zu simulieren.

Das Fraunhofer IWU trug mit eniBRIC zu dieser Entwicklung bei: Als generischer Energiebaustein ermöglichte dieser erstmalig in akzeptabler Geschwindigkeit (Zeitfaktor ca. 1.4 gegenüber Simulation ohne Energiebetrachtung) und mit geringem Modellieraufwand eine Simulation des energetischen Verhaltens unterschiedlichster Fabrikobjekte wie Maschinen, Anlagen, Steuerungen oder Verkettungseinrichtungen, aber auch von Kälte- oder Druckluftzentralen, Beleuchtungen oder anderen Einrichtungen der Produktions- und Gebäudeinfrastruktur (Putz et al. 2011). Zu untersuchende Objekte werden in eniBRIC energetisch mittels diskreter Betriebszustände konstanter Leistungsaufnahme charakterisiert, über welche der Produktionsprozess mit individueller Granularität energetisch modelliert wird. Diese Betriebszustände sind mit frei spezifizierbaren Medien- bzw. Energieverbräuchen verbunden (Elektroenergie, Kälte, Wärme, Druckluft, etc.) (Schlegel et al. 2012). Objekte können Materialflüsse oder auch Energieflüsse in betriebszustandsabhängiger Intensität realisieren. Ein Senken-/Quellendualismus der eniBRIC-Bausteine bedeutet, dass diese selbst für andere eniBRIC-Bausteine Prozessmedien bzw. Energie bereitstellen können. Art und Umfang der Bereitstellung wird ebenfalls über die Betriebszustände bestimmt, die neben einem Ressourcenbedarf auch über eine parametrierbare Ressourcenbereitstellung verfügen. Übergänge zwischen den Betriebszuständen erfolgen dabei geplant, wie z.B. das Anfahren einer stillstehenden Anlage nach einer Freischicht, oder auch ungeplant wie ein Störungseintritt. Dies wird durch den Materialfluss bedingt und ruft bspw. einen Übergang von „arbeitend“ zu „wartend“ oder „blockiert“ hervor, bei gleichzeitigem Abriss oder bzw. Stauung der Teileversorgung. Dabei können die Übergänge instantan erfolgen oder auch mit bestimmten Transaktionszeiten und (energetischen) Transaktionskosten behaftet sein. Über einen Betriebszustand hinweg wird die Leistungsaufnahme als konstant definiert.

Forschungsarbeiten mit eniBRIC betrafen die energetische Analyse von Fertigungsprozessen (Stoldt et al. 2013), die Erprobung neuer energiebezogener Steuerungsverfahren (Neugebauer et al. 2012; Putz et al. 2014) sowie die Unterstützung bei der Umsetzung von Energiemanagementsystemen (Putz et al. 2012). Waren die ersten Anwendungsfälle noch im Bereich der Automobilproduktion angesiedelt, erfolgte schon frühzeitig eine Verallgemeinerung für andere Branchen. Ein Beispiel hierfür ist die von Fanghänel et al., (2015) durchgeführte Untersuchung energetischer Flexibilitätspotenziale im kombinierten Betrieb von Kraftwerk und Braunkohletagebau. Aus der Verlagerung des Forschungsfokus von der Energieeffizienz auf den Aspekt der Energieflexibilität (Stoldt et al. 2015b) ergab sich die Anforderung einer Funktionserweiterung von eniBRIC. Dieser erlaubt nun sowohl die Modellierung lokaler Energiespeicher, als auch die modellhafte Abbildung

lokaler, ggf. volatiler Energiequellen mit einem fluktuierenden und schwer plan- bzw. prognostizierbaren Einspeiseverhalten, wie es für Wind- und PV-Anlagen charakteristisch ist (Stoldt et al. 2017).

Den Begriff der Energieflexibilität verknüpfte Graßl, (2015) mit konkreteren Energieflexibilitätsmaßnahmen (EF-Maßnahmen) für Produktionsprozesse, die eine Anpassung des Energiebedarfs entsprechend dem Energieangebot ermöglichen. Diese Maßnahmen wurden von verschiedenen Autoren (Beier et al. 2015; Ghadimi et al. 2015; Schultz et al. 2015) aufgegriffen und haben sich über die wissenschaftliche Diskussion und praktischer Erprobung mittlerweile soweit etabliert, dass sie als Quasi-Standard angesehen werden können.

Das zweite vorgestellte Werkzeug eFlex-Tool geht auf Forschungsarbeiten im Rahmen des Kopernikus-Vorhabens SynErgie zurück und nimmt direkt auf diese Energieflexibilitätsmaßnahmen Bezug (Prell et al. 2018). Seine Entwicklung zielte explizit darauf ab, ein vordefiniertes Set an Maßnahmen zur Erhöhung der Energieflexibilität aufwandsarm in bestehende Simulationsmodelle integrieren und somit das energetische Flexibilisierungspotenzial des modellierten Realsystems bewerten zu können. Auch hier wurde ein Modellierungskonzept gewählt, das auf Betriebszuständen basiert und diese als deterministische Zustandsautomaten miteinander verbindet. Während dieses Konzept implizit durch die Betriebszustandswechsel der Materialflusselemente im eniBRIC zu finden ist, wurde es für das eFlex-Tool mit eigenem Programmcode explizit umgesetzt. Die ansteuerbaren Zustände dieses Zustandsautomatenmodells sind somit direkt bei Festlegung mit Energiebedarfen verbunden. Für die systematische Integration der Energieflexibilitätsmaßnahmen in die Materialflusssimulation beinhaltet das eFlex-Tool Elemente zur Produktionssteuerung und zur energieindizierten Manipulation des Materialflusses im verbundenen Modell. Hierbei lässt sich die logische Zweiteilung des eFlex-Maschinenmoduls, also jener Instanz, die zu jeder Maschine bzw. Materialflussstation assoziiert ist, feststellen: Die Ressourcenverbrauchsdokumentation bildet das Energieverhalten ab und dokumentiert es über die fortschreitende Zeit. Die Materialflusssteuerung startet, stoppt oder ändert die Flussintensität durch den assoziierten Materialflussbaustein (Prell et al. 2018).

### 3 Vergleich von eniBRIC und eFlex-Tool

Beide Erweiterungen sind in den Bereich der Energieeffizienz- und Energieflexibilitätsuntersuchung im Produktionskontext einzuordnen und weisen viele Ähnlichkeiten auf. Der folgende Vergleich soll auf strukturierte Weise die Überschneidungen und Anwendungsschwerpunkte herausarbeiten und bedient sich teilweise der in einer Arbeitsgruppe der ASIM-Fachgruppe SPL erarbeiteten Kriterien zur Einordnung simulationsbasierter Ansätze zur Berücksichtigung energetischer Einflussfaktoren in Produktion und Logistik (Wenzel et al. 2017). Es wurden hierbei solche Kriterien ausgewählt, die für das o.g. Ziel geeignet erscheinen.

#### *Detailierungsgrad der Modellierung*

Der Detailierungsgrad in ereignisdiskreten Simulationsumgebungen ist von den Ereignissen und der Häufigkeit sowie der Regelmäßigkeit ihres Auftretens abhängig. Ereignisse werden zu Zeitpunkten ausgelöst, bei denen sich logistische Zustände wie bspw. zum Ende der Bearbeitung eines Werkstücks auf einer Maschine ändern. Um

die beiden Erweiterungen trotz dieser starken Abhängigkeit diskutieren zu können, soll folgend die energetische Detaillierung gemeint sein. Beide Erweiterungen bieten die Möglichkeit, eine beliebige Anzahl definierter Betriebszustände (BZ) eines modellierten Objekts, z.B. einer Bearbeitungsstation, zu berücksichtigen, um somit unterschiedliche energetische Zustände und deren Verläufe nachzubilden. Da innerhalb dieser Zustände ein konstanter Leistungsbedarf abgebildet ist, wird durch die Anzahl und Verknüpfung der BZ der Detaillierungsgrad in der energetischen Modellierung festgelegt. Standardmäßig bildet eniBRIC die BZ und damit verbundenen energetischen Zustände objektspezifisch, z.B. für jede modellierte Maschine ab. Das eFlex-Tool bietet darüber hinaus direkt die Möglichkeit, den angesteuerten Energiezustand auch produktspezifisch, also in Abhängigkeit von der Art und dem Fertigstellungszustand des herzustellenden Werkstücks zu gestalten. Mit dieser stärkeren Trennung von BZ und energetischen Zustand im eFlex-Tool ist ein höherer Detaillierungsgrad möglich, dessen Vorteile vor allem bei der Abbildung von Prozessen offenbar werden, in denen viele unterschiedliche Produkte mit stark differierenden Energiebedarfen auf denselben Anlagen bearbeitet werden.

#### *Stellung in der Wertschöpfungskette, Architektur und Robustheit*

Die modellierbare Fertigungsstruktur, -art und Branche kann für beide Erweiterungen als gleich angesehen werden. Auch wenn typische intralogistische Fragestellungen der Materialflusssimulation als Ausgangspunkt der Entwicklung dienen, sind diese nicht darauf beschränkt. Beide Erweiterungen verfolgen den Add-In-Ansatz, sodass sie aufwandsarm in bestehende Materialflussmodelle eingefügt werden können. Die klassische Einzelstation diente hierbei stellvertretend für alle Materialflussbausteine als Entwicklungsgrundlage zur Schnittstellenentwicklung. Die Synchronisierung zwischen Materialfluss und energetischem Zustand erfolgt über die Betriebszustände mit den hinterlegten Transitionszeiten und -bedingungen. Während der eniBRIC sich hierbei passiv verhält und die Information über den Materialfluss entsprechend dem Betriebszustand in Energie bzw. energienahe Medienströme übersetzt, findet durch das eFlex-Tool eine aktive Manipulation des Materialflusses statt. Somit lässt sich ein Unterschied der Schnittstellenausgestaltung erkennen, der sich als uni- gegenüber bidirektionalen Charakter zusammenfassen lässt. Der eniBRIC wird bereits seit 2012 in verschiedenen Projekten eingesetzt und wurde an unterschiedlichsten Materialflusselementen erfolgreich erprobt, wohingegen für das 2018 entstandene eFlex-Tool ein derartiger Einsatz noch aussteht. .

#### *Modellierung betrieblicher Infrastruktur und Peripherie*

Das eFlex-Tool verbindet pseudolokale e-Flex-Maschinenmodelle mit den eigentlichen Materialflusselementen. Diese eFlex-Maschinenmodelle sind zentral übersichtlich nebeneinander angeordnet, sodass dieser Aufbau an einen Verteilerraum mit mehreren nebeneinander angeordneten Stromzählern erinnert. Die einzelnen Ressourcenverbrauchsdokumentationen der eFlex-Maschinenmodelle können weiteren Auswertungselementen hierarchisch zugeordnet werden, sodass die Netzwerkstruktur, bspw. der elektrischen Versorgung eine Entsprechung im Modell findet. Diese Möglichkeit, Versorgungsstrukturen nachzubilden, ist jedoch auf die Nachbildung der Struktur *einer* Ressourcenbereitstellung limitiert. Der eniBRIC hingegen sieht die Strukturmodellierung über unabhängige und verschachtelbare Quellen-Senken-Beziehungen vor und bietet seit der letzten Weiterentwicklung auch vorparametrierte Energiespeicher und erneuerbare Erzeuger an. Ein Pooling von

gleichartigen Ressourcen (bspw. Elektroenergie) findet über einen ebenfalls mit der letzten Weiterentwicklung entstandenen Baustein statt, der sich mehreren Erzeugern gegenüber als Verbraucher ausgibt und die so eingehende Energie wieder an angeschlossene Verbraucher in der Rolle des Erzeugers weitergibt.

#### Modellierung von EF-Maßnahmen

In ihrer Fähigkeit zur Abbildung von Maßnahmen der Energieflexibilisierung unterscheiden sich beide Werkzeuge am meisten: Während eniBRIC durch die Dokumentation von Energieverbrauchsdaten die Basis solcher Betrachtungen schafft, hat das eFlex-Tool bereits die Ausführung eines Produktionsplans integriert. Der Produktionsplan wird zentral im Modell bereitgestellt und an die pseudolokalen Maschinenmodelle weitergereicht. Die EF-Maßnahmen nach Graßl, (2015) werden nach einem ähnlichen Muster behandelt. Wenn eine solche Maßnahme ergriffen werden soll, kann sie über ein zentrales Element an die pseudolokalen Maschinenmodelle eingesteuert werden, die letztendlich den Materialfluss manipulieren können und in der Maßnahme entsprechende Betriebs- und damit verbundene Energiezustände wechseln. In eniBRIC sind a priori keine Strategien und Maßnahmen zur energieflexiblen Steuerung hinterlegt.

#### Energiebezogene Eingangsdaten

Während die Detaillierung des Energieprofils einzelner Anlagen, Maschinen, Prozesse oder gar Teilprozesse dem Anwender überlassen wird, setzt der Einsatz der jeweiligen Erweiterungen jedoch verfügbare Eingangsdaten voraus. Hierzu zählt für beide Werkzeuge die Leistungsaufnahme der betrachteten Maschinen für die einzelnen Betriebs- bzw. Energiezustände. Das eFlex-Tool sieht hier auch werkstückabhängige Eintragungen vor, wohingegen eniBRIC einen pragmatischeren Ansatz verfolgt. Da der eniBRIC auf einen Produktionsplan verzichtet, muss hier auch kein Schnittstellenformat berücksichtigt werden.

Die Ergebnisse des Vergleichs werden in Abbildung 2 kompakt dargestellt.

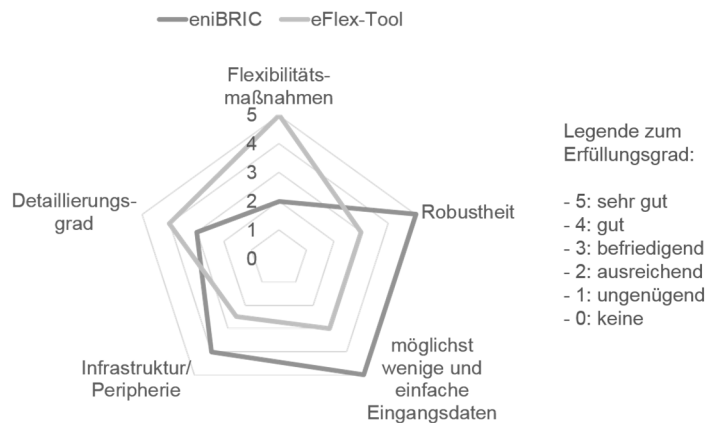
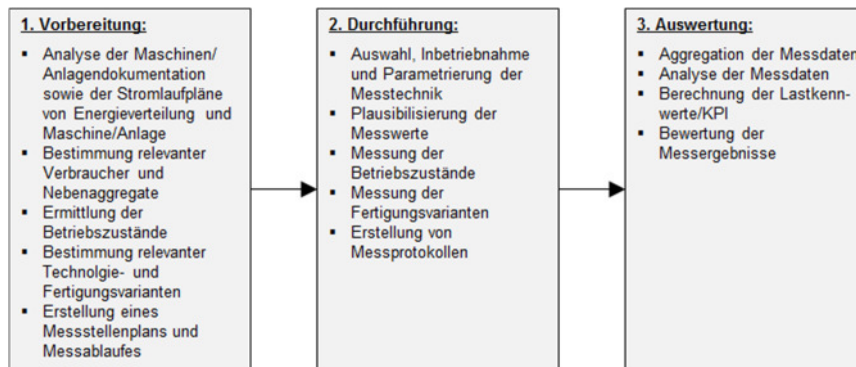


Abbildung 2: PlantSim-Erweiterungen eniBRIC und eFlex-Tool im Vergleich

Abschließend lässt sich zusammenfassen, dass eniBRIC einen generischen Ansatz darstellt, sehr pragmatisch Betrachtungen zu gekoppelten Energie-, Material- und Medienflüssen in Produktionssystemen anzustellen, ohne dass hierzu zusätzliche Anforderungen an die Modellierung energiebezogener Steuerungen gestellt werden. Dies bietet eine flexible Möglichkeit, sehr unterschiedliche energetische Fragestellungen in vielen praxisnahen Simulationen aufwandsarm zu integrieren. Das eFlex-Tool geht darüber hinaus mehr in Richtung der energiebezogenen Steuerung und bietet eine Vorlage zur konkreten Abbildung von Flexibilitätsmaßnahmen. Dies geht wie in allen Softwarewerkzeugen auf Kosten von Generalität und der Verschärfung von Anforderungen an Datenqualität und Schnittstellen. Beide Werkzeuge bieten für den Anwender jedoch eine Erleichterung, wenn spezifische Fragestellungen untersucht werden sollen.

## 4 Ermittlung von Lastkennwerten

Eine wesentliche Aufgabe bei der Abbildung der (Elektro-)Energie sowohl in eniBRIC als auch im eFlex-Tool stellt die Ermittlung der maschinenspezifischen und zustandsabhängigen Lastkennwerte dar. Nenndaten der Maschinen geben eine erste Orientierung, bilden aber nicht das Realverhalten und die Differenzierung in Betriebszustände der Maschinen oder Anlagen ab. Deshalb ist eine messtechnische Bestimmung der Lastkennwerte notwendig. Grundsätzlich eignet sich die Nutzung mobiler und stationären Leistungsmesstechnik. Im Zuge der Energieeffizienzbestrebungen der letzten Jahre ist die Nutzung von kompakten Universalmessgeräten oder Leistungsanalysatoren in Maschinen und Anlagen Stand der Technik (z. B. Janitza UMG, Siemens SENTRON PAC, o. ä.) (Richter 2014). Die hohe Verbreitung dieser Messsysteme, aber auch die Möglichkeit, Energiedaten aus den Maschinensteuerungen auszulesen, vereinfacht die Bestimmung der Lastkennwerte für die Simulation. In Abbildung 3 ist ein Ablauf dargestellt, der die wesentlichen Punkte beinhaltet, die für die Durchführung einer Messkampagne zu berücksichtigen sind.



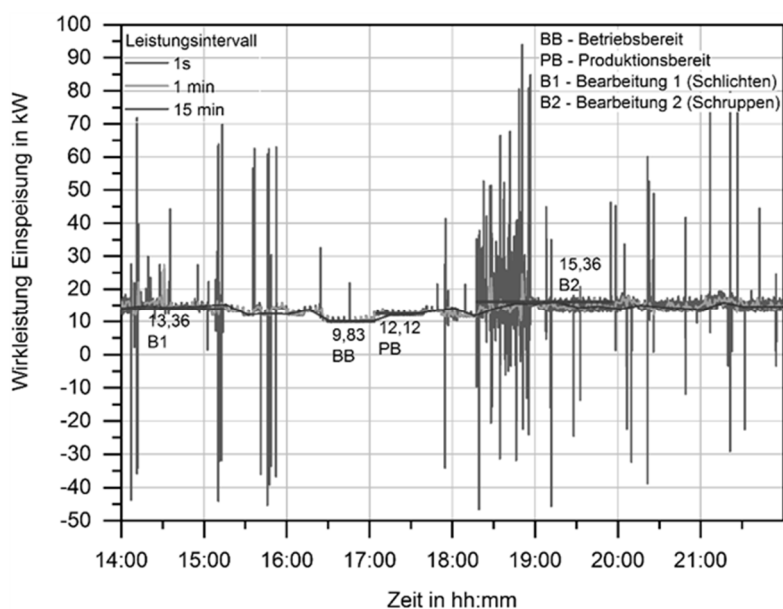
**Abbildung 3:** Durchführung einer Messkampagne

In der Vorbereitungsphase wird die Maschine/Anlage hinsichtlich der Funktionsweise, den Fertigungsvarianten, der Elektrokonstruktion und der Betriebszuständen analysiert. Dabei sind auch die Neben-/Zusatzaggregate der Maschine zu berücksichtigen. Mit den gewonnenen Erkenntnissen wird ein



Messkonzept und Messstellenplan entworfen, der alle relevanten Einspeisepunkte und Energieverbraucher beinhaltet. In der nächsten Phase werden geeignete Messgeräte ausgewählt, in Betrieb genommen und parametrisiert. Hierbei gilt es, geeignete Aufzeichnungsraten in Abhängigkeit vom Maschinen- oder Anlagentyp auszuwählen, um die Genauigkeit und Aussagekraft der Leistungsmesswerte zu gewährleisten. Insbesondere um die hochdynamischen Leistungsänderungen von Antriebssystemen aufzuzeichnen, sind Leistungsintervalle im Sekundenbereich oder kleiner erstrebenswert. Wird das Aufzeichnungsintervall zu groß gewählt, können die Leistungsniveaus der Betriebszustände nicht mehr unterschieden werden (s. Abb. 4).

Bevor die Messungen durchgeführt werden können, sind die Messwerte des Messgerätes (u.a. Ströme, Spannungen, Wirk-, Blind-, Scheinleistung, Leistungsfaktor) zu prüfen und zu plausibilisieren, um Messfehler frühzeitig auszuschließen. Anschließend werden die Grundbetriebszustände der Maschine gemessen (z. B. Betriebsbereit, Produktionsbereit) (VDMA 2015). Danach erfolgt die Vermessung der technologie- und maschinenabhängigen Fertigungsvarianten. Zur Verringerung des Aufwandes während der laufenden Produktion kann es zielführend sein, Langzeitmessungen (z. B. 2 Wochen) durchzuführen, anstatt einzelne Prozessschritte zu vermessen.



**Abbildung 4:** Leistungsverlauf und Betriebszustände eines 5-Achs-Fräsbearbeitungszentrums

Die Betriebszustände und Fertigungsvarianten können zum einen durch händische Notizen der Werker oder zum anderen durch den Datenzugriff/-export auf die Prozessdatenerfassung der Maschine bzw. die Betriebsdatenerfassung des Unternehmens bestimmt werden. Diese werden in der Auswertungsphase mit den Leistungsverläufen der Maschinen verknüpft. Sind die Messdaten erfasst, werden diese analysiert und die Kennwerte für die Betriebszustände und Fertigungsvarianten

bestimmt. Um die Messdaten in der üblichen Software (MS Excel) auswerten zu können, sind anwendungsspezifische Aggregations- und Exportstufen sinnvoll.

## 5 Zusammenfassung

Bei den Bestrebungen der Industrie, die Umweltwirkungen von Energieversorgung und -nutzung zu reduzieren, fand eine Verschiebung des Fokus von Effizienzbetrachtungen zu Energieflexibilität statt, was insbesondere für große Verbraucher als relevant betrachtet wird. Mit eniBRIC und dem eFlex-Tool stehen zwei Erweiterungen für Plant Simulation zur Verfügung, die auf diese Verschiebung mit unterschiedlichen Ansätzen reagieren. Das bereits praxiserprobte eniBRIC ist eine generische Lösung zur simulativen Absicherung von Maßnahmen in Richtung Energieeffizienz und Energiesuffizienz sowie ein pragmatischer Ansatz für erste Flexibilitätsüberlegungen. Das eFlex-Tool bietet bereits eine vorgegebene, aber erweiterbare Sammlung von Flexibilitätsmaßnahmen, deren Umsetzung mit ebenfalls vorbereiteten Steuersignalen angestoßen werden kann. Dabei benötigt das eFlex-Tool eine umfangreichere Integration in das Materialflussmodell als dies bei eniBRIC der Fall ist. Beiden Erweiterungen gleich ist, dass diese maßgeblich auf den Maschinenzuständen aufbauen, die mit energetischen Bedarfen versehen sind. Elektroenergie ist hierbei der zumeist betrachtete Energieträger. Diese Eingangsgrößen können mit dem vorgestellten Ansatz pragmatisch, aber dennoch für die weitere Analyse belastbar ermittelt werden.

## Danksagung

Die Autoren bedanken sich herzlich beim Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) für die finanzielle Unterstützung und beim Projektträger Jülich (PtJ) für die Betreuung des Kopernikus-Projektes „SynErgie“.

## Literatur

- Beier, J.; Thiede, S.; Herrmann, C.: Increasing Energy Flexibility of Manufacturing Systems through Flexible Compressed Air Generation. *Procedia CIRP* 37 (2015), S. 18–23.
- eurostat. Energy balance sheets: 2016 data : published 2018.
- Fanghänel, C.; Schlegel, A.; Stoldt, J.; Putz, M.; Lange, H. R.; Woldt, T.: Energieeffizienzsteigerung im Tagebaubetrieb durch simulationsgestützte Untersuchung konkurrierender Flexibilitäten. In: Rabe, M; Clausen, U. (Eds.): *Simulation in Production and Logistics 2015*. Stuttgart: Fraunhofer Verlag 2015, S. 545–554.
- Ghadimi, P.; Kara, S.; Kornfeld, B.: Renewable energy integration into factories: Real-time control of on-site energy systems. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 64 (2015), 443–446.
- Graßl, M.: *Bewertung der Energieflexibilität in der Produktion*. München: Utz 2015.
- Haag, H.: *Eine Methodik zur modellbasierten Planung und Bewertung der Energieeffizienz in der Produktion*. Stuttgart: Fraunhofer 2013.
- Keller, F.; Reinhart, G.: Energy Supply Orientation in Production Planning Systems. *Procedia CIRP* 40 (2016), S. 244–249.

- Neugebauer, R.; Putz, M.; Schlegel, A.; Langer, T.; Franz, E.; Lorenz, S.: Energy-Sensitive Production Control in Mixed Model Manufacturing Processes. In: Dornfeld, D. A.; Linke, B. S. (Eds.): *Leveraging Technology for a Sustainable World.*, Berlin, Heidelberg: Springer 2012, S. 399–404.
- Prell, B.; Stoldt, J.; Putz, M.; Schlüter, P.; Szabo, A.; Bergs, C.; Unterberger, E.; Reinhart, G.; Moog, D.; Flum, D. et al.: Simulation von Steuerungsmaßnahmen zum energieflexiblen Fabrikbetrieb. In: Riedel, R. (Ed.): *Smarte Produktion und Digitale Vernetzung.* Chemnitz: Wissenschaftliche Schriftenreihe des Institutes für Betriebswissenschaften und Fabriksysteme, S. 79–88.
- Putz, M.; Schlegel, A.; Lorenz, S.; Schulz, S.; Franz, E.: Gekoppelte Simulation von Material- und Energieflüssen in der Automobilfertigung. Nachhaltigkeit in Fabrikplanung und Fabrikbetrieb. In: Müller, E.; Spanner-Ulmer, B.: *TBI'11*, 14. Tage des Betriebs- und Systemingenieur. Chemnitz: Wissenschaftliche Schriftenreihe des Institutes für Betriebswissenschaften und Fabriksysteme 2011, S.135–144.
- Putz, M., Schlegel, A., Stoldt, J., Franz, E., Langer, T., and Tiszl, M. : A framework for energy-sensitive production control in MES. In: Ilie-Zudor, E.; Kemény, Z.; Monostori, L. (Eds.): *Proceedings 14th International Conference on Modern Information Technology in the Innovation Processes of the Industrial Enterprises*, Budapest: 24.-26.10.2012, S. 354–366.
- Putz, M.; Schlegel, A.; Stoldt, J.; Franz, E.; Langer, T.: Energy-sensitive control strategies for decoupled production systems. *International Journal of Sustainable Manufacturing* 3 (2014), S. 250–268.
- Rager, M.: *2008 Energieorientierte Produktionsplanung: Analyse, Konzeption und Umsetzung.* Wiesbaden: Gabler 2008.
- Richter, M.: Energiedatenerfassung. In: Neugebauer, R. (Ed.): *Handbuch Ressourcenorientierte Produktion.* München: Hanser 2014, S. 91–124.
- Schlegel, A.; Richter, D.; Schikade, N.: Energy-conscious planning of car body manufacturing - from production engineering to compressed air infrastructure. In *International Rotating Equipment.* Frankfurt a. M.: VDMA 2012, S. 51-61.
- Schultz, C.; Sellmaier, P.; Reinhart, G.: An Approach for Energy-oriented Production Control Using Energy Flexibility. *Procedia CIRP* 29 (2015), S. 197–202.
- Spreng, S.; Kohl, J.; Franke, J.: Automatisierte Erweiterung bestehender Materialflusssimulationen durch Energieaspekte. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 108 (2013), S. 647–651.
- Statistisches Bundesamt: *Pressemitteilung Nr. 426*, 2018.
- Stoldt, J.; Schlegel, A.; Franz, E.; Langer, T.; Putz, M.: Generic Energy-Enhancement Module for Consumption Analysis of Manufacturing Processes in Discrete Event Simulation. In: Nee, A. Y. C.; Song, B. Ong S.-K. (Eds): *Re-Engineering Manufacturing for Sustainability: Proceedings of the 20th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering.* Singapore: Springer 2013., S. 165–170.
- Stoldt, J.; Cherkaskyy, M.; Franz, E.; Putz, M.; Oertwig, N.; Uhlmann, E. (2015a). Modellierung von Energietechnologien zum nachhaltigen Reengineering von Produktionsunternehmen. In: Müller, E. (Ed.): *Planung Und Betrieb von Produktionssystemen Im Digitalen Zeitalter : VPP2015 - Vernetzt Planen Und Produzieren.* Chemnitz: Wissenschaftliche Schriftenreihe des Institutes für Betriebswissenschaften und Fabriksysteme 2015, S. 81–90.

- Stoldt, J.; Franz, E.; Schlegel, A.; Putz, M. (2015b) Resource Networks: Decentralised Factory Operation Utilising Renewable Energy Sources. *Procedia CIRP* 26, S. 486–491.
- Stoldt, J.; Schlegel, A.; Putz, M.: Enhanced integration of energy-related considerations in discrete event simulation for manufacturing applications. *Journal of Simulation* 10 (2016), S. 113–122.
- Stoldt, J.; Prell, B.; Schlegel, A.; Putz, M.: Modellierung von volatilen erneuerbaren Energieerzeugern und Energiespeichern in Siemens Plant Simulation. In: Wenzel, S.; Peter, T. (Eds.): *Simulation in Produktion und Logistik 2017*, (Kassel: university press), S. 49–58.
- Thiede, S.: *Energy Efficiency in Manufacturing Systems*. Berlin, Heidelberg: Springer 2012.
- Thiede, S.; Seow, Y.; Andersson, J.; Johansson, B.: Environmental aspects in manufacturing system modelling and simulation—State of the art and research perspectives. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 6 (2013), S. 78–87.
- VDMA: 34179. Messvorschrift zur Bestimmung des Energie- und Medienbedarfs von Werkzeugmaschinen in der Serienfertigung (Frankfurt a. M.: VDMA 2015).
- Wenzel, S.; Peter, T.; Stoldt, J.; Schlegel, A.; Groß, G.; Pitsch, H.; Rabe, M.; Seewaldt, M. . Betrachtungen energetischer Einflussfaktoren in der Simulation in Produktion und Logistik: Eine Literaturanalyse. In: Wenzel, S.; Peter, T.(Eds): *Simulation in Produktion und Logistik 2017*, Kassel: kassel university press 2017, S. 9–18.