

Schlussbericht

der Forschungsstelle(n)

IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover gemeinnützige GmbH

zu dem über die



im Rahmen des Programms zur
Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF)

vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

geförderten Vorhaben **17900 N**

***Integration zeitvariabler Energiekosten als Entscheidungsgrundlage in die Verfahren
der Fertigungssteuerung***

(Bevolligungszeitraum: 01.12.2013 - 31.12.2015)

der AiF-Forschungsvereinigung

Bundesvereinigung Logistik e. V. (BVL)

Hannover, 08.04.2016

Ort, Datum

Stefan Willeke

Name und Unterschrift des/der Projektleiter(s)
an der/den Forschungsstelle(n)

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhaltsverzeichnis

1. Zusammenfassung	1
2. Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung	3
3. Gegenüberstellung angestrebter Teilziele und erzielter Ergebnisse	4
4. Darstellung der erzielten Ergebnisse	7
4.1 Analyse	7
4.1.1 Analyse aktueller und zukünftiger Stromtarife	7
4.1.2 Einfluss der Fertigungssteuerung auf die Energiekosten	13
4.1.3 Auswahl der zu erweiternden Fertigungssteuerungsverfahren.....	17
4.1.4 Identifikation energiekostenrelevanter Stellhebel der ausgewählten Fertigungssteuerungsverfahren.....	18
4.2 Konzeption	19
4.2.1 Energiekostenorientierte Auftragsfreigabe	19
4.2.2 Energiekostenorientierte Reihenfolgebildung	23
4.2.3 Energiekostenorientierte Rückstandsregelung	26
4.3 Validierung	30
4.3.1 Aufbau und Verifikation des Simulationsmodells	30
4.3.2 Ergebnisse der Validierung der energiekostenorientierten Auftragsfreigabe nach Termin	32
4.3.3 Ergebnisse der Validierung der energiekostenorientierten Reihenfolgebildung.....	38
4.3.4 Ergebnisse der Validierung der energiekostenorientierten Rückstandsregelung.....	43
4.4 Kritische Diskussion	47
5. Innovativer Beitrag und wirtschaftlicher Nutzen	49
5.1 Voraussichtliche Nutzung der angestrebten Forschungsergebnisse.....	49
5.2 Möglicher Beitrag zur Steigerung der Leistungs- und Wettbewerbsfähigkeit kleiner und mittlerer Unternehmen	49
6. Verwendung der Zuwendung	51

7. Umsetzung der Forschungsergebnisse / Transfer der Ergebnisse in die Wirtschaft.....	52
8. Durchführende Forschungsstelle	56
9. Förderhinweis.....	58
10. Anhang	59
10.1 Wirkmodelle - Einfluss der Fertigungssteuerung auf die Energiekosten	59
10.2 Prozessketten der weiterentwickelten Fertigungssteuerungsverfahren	63
11. Literaturverzeichnis	69
12. Abbildungsverzeichnis	72
13. Tabellenverzeichnis	75

1. Zusammenfassung

Die internationale Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Industrie wird in den kommenden Jahren besonders durch steigende Beschaffungskosten für Strom beeinträchtigt werden, da der Anteil der Energiekosten an den Produktionskosten teilweise sehr hoch ist [ECO15, Pro14, Sch11]. Neben den steigenden Stromkosten durch politische Maßnahmen und Umlagen wird die Volatilität des Strompreises im Tages- als auch im Jahresverlauf in den kommenden Jahren stark anwachsen. Die Volatilität des Strompreises ist eine Folge der unsicheren Erzeugungsleistung der immer weiter ausgebauten erneuerbaren Kraftwerkstypen wie Wind- oder Solarenergieanlagen. Da durch die regenerativen Energieerzeugungsanlagen nur bei Wind oder Sonne Energie bereitgestellt wird, müssen häufig zusätzliche Kraftwerke zugeschaltet werden, wodurch schwankenden Erzeugungskosten für Strom resultieren [Kal12]. Da der Anteil des eingespeisten Stroms durch regenerative Energieträger von 28% in 2014 auf 80% in 2050 steigen soll, muss zudem mittelfristig die Stromnachfrage an das Stromangebot angepasst werden [BDE15]. Die Forderung nach dynamischen Tarifmodellen wird diesem Sachverhalt gerecht [EnE12, EnW14]. Werden im Folgenden die volatilen Strompreise bei auftragsabhängig schwankenden elektrischen Leistungen der einzelnen Produktionsanlagen nicht zielgerichtet berücksichtigt, kann dies mit empfindlichen Mehrkosten verbunden sein. Als Mittel zur Reduktion der Energiekosten kann die Produktionsplanung und -steuerung (PPS) über die Anpassung der Stromnachfrage an das Stromangebot dienen. Gerade die Fertigungssteuerung als Teilbereich der PPS, welche einen unmittelbaren Effekt auf den zeitlichen Energieverbrauch eines Unternehmens hat, kann so auch die Energiekosten der Produktion durch organisatorische Maßnahmen und ohne große Investitionen reduzieren. Die Fertigungssteuerung hat zum Ziel, den Produktionsplan trotz häufig unvermeidlicher Störungen umzusetzen. Durch eine Steuerung der Aufträge können die logistischen Zielgrößen (Durchlaufzeit, Bestand, Termintreue, Auslastung) erheblich beeinflusst werden [Wie97]. Aktuell ist jedoch kein Fertigungssteuerungsverfahren in der Lage, die schwanken Energiepreise zu berücksichtigen und die Energiekosten der Fertigung zielgerichtet zu reduzieren, ohne die logistischen Zielgrößen zu gefährden.

Als Ergebnis dieses Vorhabens sind drei weiterentwickelte Fertigungssteuerungsverfahren entstanden, welche eine Energiekostenreduktion bei konstantem Energieverbrauch ermöglichen. Die weiterentwickelten energiekostenorientierten Verfahren zur Auftragsfreigabe, Reihenfolgebildung und Kapazitätssteuerung berücksichtigen sowohl die volatilen Strompreise als auch die auftragspezifisch schwankenden elektrischen Leistungen. Durch die Anwendung der Verfahren können KMU die

Energiekosten reduzieren, ohne eine merkbare Verschlechterung der logistischen Zielgrößen in Kauf nehmen zu müssen.

Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.

2. Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

Gerade in der energieintensiven Industrie ist der Anteil der Energiekosten an den Produktionskosten sehr hoch. In einigen ausgewählten Branchen in Deutschland übersteigen die Energiekosten bereits jetzt die Personalkosten [Rie12]. Dies ist eine Folge des starken Anstieges des Strompreises für Industriekunden. Der durchschnittliche Strompreis für die Industrie hat sich seit dem Jahr 2000 infolge eines Anstiegs an Steuern und Umlagen um 255% erhöht [BDE16]. Experten prognostizieren zudem mindestens bis 2025 weiter steigende Energiepreise und zunehmende Strompreisschwankungen durch die volatile Energieerzeugung der regenerativen Energieträger [Pro14], um im Sinne der Netzstabilität die Stromnachfrage an das Stromangebot anzupassen zu können.

Eine Lösung zur Anpassung der Energienachfrage an das Energieangebot (in diesem Fall dargestellt durch den Energiepreis) stellt Demand Response¹ dar. Diese Art der Laststeuerung anhand von preislichen Anreizen für den Energienachfrager kann durch folgende Maßnahmen umgesetzt werden [Roo10]:

- Reduktion der Last
- Verschieben der Last
- Puffern der Last
- Erhöhung der Last

Die Fertigungssteuerung als Bestandteil der Produktionsplanung und -steuerung (PPS) legt auf Grundlage des Produktionsprogramms fest, wann ein Auftrag auf einer Anlage bearbeitet wird. Damit bestimmt die Fertigungssteuerung unmittelbar den zeitlichen Energieverbrauchsverlauf und trägt zu einem möglichen Verschieben der Last in Rahmen von Demand Response bei. Gerade bei einer auftragsbezogenen Produktion erzeugen die Produktmerkmale (Größe, Gewicht, Komplexität) Schwankungen des Energiebedarfs an den einzelnen Produktionsanlagen. Beispielsweise ist die Leistungsaufnahme einer Fräsmaschine um 30% höher, wenn der Durchmesser des Fräskopfes um 50 % erhöht wird [Mül12]. Durch eine Veränderung der zeitlichen Abfolge der Fertigungsaufträge kann der Energieverbrauchsverlauf über der Zeit somit stark verändert werden.

In der Literatur vorgestellte Methoden, welche Energieverbräuche und -kosten in der Produktionsplanung und -steuerung berücksichtigen, beschränken sich vor allem auf die Reduktion des Energieverbrauches bzw. der Erhöhung der Energieeffizienz in der Reihenfolgeplanungs- und Terminierungsphase und vernachlässigen den sich kurzfristig ändernden schwankenden Energiepreis [u.a. Bru12, Art13].

¹ engl. für Nachfragesteuerung

3. Gegenüberstellung angestrebter Teilziele und erzielter Ergebnisse

Ziel des Forschungsvorhabens war die Weiterentwicklung von Fertigungssteuerungsverfahren, die insbesondere von kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) angewendet werden können. Die Verfahren sollten eine Reduzierung der durch die Fertigungssteuerung entstehenden Energiekosten bewirken ohne die logistischen Zielgrößen merklich zu verschlechtern. Zur Erreichung des Ziels sind im Forschungsantrag drei Teilziele festgelegt worden, denen nachfolgend die erreichten Ergebnisse aus den Arbeitspaketen (AP) gegenübergestellt werden.

Teilziel 1:

Angestrebtes Teilziel aus dem Forschungsantrag: Das erste Teilziel besteht in der Analyse aktueller und zukünftiger Stromtarife für KMU. Des Weiteren sollen Einflussfaktoren bezüglich unterschiedlicher Energieverbräuche auf Arbeitssysteme in Abhängigkeit der Fertigungsaufträge identifiziert werden. Zur Erreichung des Teilziels ist eine allgemeingültige Kostenfunktion zu entwickeln, welche in Abhängigkeit der Zeit und des Energieverbrauches des Arbeitsinhaltes der Maschinen die resultierenden Energiekosten berechnet. In die Kostenfunktion werden sowohl schwankende Energiepreise als auch sämtliche Einflussfaktoren der Maschine und Aufträge auf den Energieverbrauch integriert.

Korrespondierende Ergebnisse des Vorhabens:

In AP 1 erfolgte die Analyse industrieller Stromtarife über Literaturrecherchen sowie Experteninterviews. So nutzen KMU aktuell meist einen Tarif, welcher einen konstanten Strompreis darstellt. Zudem wurden zukünftige Stromtarife analysiert, welche der volatilen Erzeugungsleistung gerecht werden. Dabei wurde herausgestellt, dass bereits viele zeitvariable Tarife entwickelt, jedoch vor allem in Privathaushalten validiert und nur teilweise angewendet werden. Des Weiteren erfolgte in AP 1 die Aufnahme von Auftrags- und Maschinendaten bei einem Mitglied des projektbegleitenden Ausschusses. So konnte herausgestellt werden, dass die Größe und damit zusammenhängend das Gewicht eines im Induktionsofen zu erwärmenden Bauteils einen erheblichen Einfluss auf den Energieverbrauch des Ofens hat, wogegen von der Form und dem Material kein merklicher Einfluss ausging.

Eine allgemeingültige Energiekostenfunktion wurde aufgrund einer fehlenden Zweckmäßigkeit nicht entwickelt, da sich die Leistungskurven unterschiedlicher Anlagentypen (beispielsweise von Drehmaschinen, Schmieden, Lasern) zu stark unterscheiden. Zudem bedarf eine Ermittlung der Parameter einer Energiekostenfunktion eines hohen Aufwands. Dagegen wurde angenommen, dass die mittlere

elektrische Leistung eines Auftrages und einer Anlage bekannt ist, welches eine Vereinfachung der Realität darstellt.

Teilziel 2:

Angestrebtes Teilziel aus dem Forschungsantrag: *Teilziel 2 besteht in der Weiterentwicklung ausgewählter Verfahren der Fertigungssteuerung. Dafür soll zunächst das Modell der Fertigungssteuerung von Lödding um Energiekosten erweitert werden. Zudem sind anhand von wissenschaftlichen Methoden alle Einflussfaktoren auf die Energiekosten zu ermitteln und diese anhand definierter Kriterien in einer Matrix zu bewerten. Gleichzeitig sind für die vier Aufgaben der Fertigungssteuerung je ein weiterzuentwickelndes Verfahren auszuwählen, welches sich für die Anwendung in einer KMU-spezifischen Fertigungsumgebung eignet. Über Wirkmodelle sind zudem Freiheitsgrade und Restriktionen bezüglich der Beeinflussung der Energiekosten über die Verfahren der Fertigungssteuerung aufzuzeigen. Anhand der identifizierten Freiheitsgrade und Restriktionen ist ein Regelkreis-Modell zu definieren, in dem Stellgrößen zur Beeinflussung der Energiekosten dargestellt werden.*

Eine Weiterentwicklung der eigentlichen Verfahren sowie die Dokumentation der Verfahrensschritte folgen im zweiten Arbeitsschritt. Das Teilziel ist erreicht, sofern Empfehlungen zur Festlegung der Verfahrensparameter mathematisch formuliert sind.

Korrespondierende Ergebnisse des Vorhabens:

Die Integration von Energiekosten in das Modell der Fertigungssteuerung von Lödding erfolgte in AP 2. Die Einflussfaktoren auf die Energiekosten (bzw. den zeitlichen Lastgang) wurden über ein Ishikawa-Diagramm identifiziert. Über Literaturrecherchen wurden KMU-spezifische Fertigungsmerkmale (bspw. Werkstattfertigung, komplexer Materialfluss) identifiziert und die gängigen Fertigungssteuerungsverfahren auf ihre Eignung in dieser Fertigungsumgebung untersucht, in einer Matrix dargestellt und für die Aufgaben Auftragsfreigabe, Reihenfolgebildung und Kapazitätssteuerung je ein weiterzuentwickelndes Verfahren ausgewählt. Die Auftragserzeugung wurde vernachlässigt, da sie der Produktionsplanung zuzuordnen ist und aufgrund des mittelfristigen Zeithorizontes nahezu keinen Einfluss auf die Energiekosten besitzt. Über Wirkmodelle wurden im Folgenden die Bestandteile der ausgewählten Verfahren identifiziert, die einen Einfluss auf die Energiekosten haben.

In AP 3 wurden die Stellgrößen einer energiekostenorientierten Fertigungssteuerung in ein Regelkreis-Modell integriert. Das entwickelte Regelkreismodell wird jedoch nicht weiter betrachtet, da eine Bestimmung von Plan-Energiekosten aufgrund der sich kurzfristig ändernden volatilen Strompreise nur bedingt möglich ist. Ziel ist demnach nicht ein Abgleich von Plan- und Ist-Energiekosten, sondern eine situationsbezogene Energiekostenreduktion. Zudem wurden drei Verfahren (weiter-)entwickelt,

neue Verfahrensschritte formuliert und diese in einer ereignisgesteuerten Prozesskette (EPK) visualisiert. Die Festlegung der Verfahrensparameter erfolgt, wie bei nahezu allen Fertigungssteuerungsverfahren, unternehmensspezifisch.

Teilziel 3:

Angestrebtes Teilziel aus dem Forschungsantrag: Teilziel 3 besteht in der Validierung der weiterentwickelten Verfahren der Fertigungssteuerung und der Darlegung von Anwendungsgrenzen. Hierzu sollen die weiterentwickelten und die ursprünglichen Verfahren in eine Simulationsumgebung implementiert werden. Dabei ist zu untersuchen, wie sich bei unterschiedlichen Simulationsszenarien die logistischen Zielgrößen bzw. die Energiekosten verhalten. Zudem ist ein Praxistest der Verfahrensregeln bei Partnern des projektbegleitenden Ausschusses durchzuführen. Darauf aufbauend ist ein Leitfaden zur Anwendung dieser zu erstellen.

Korrespondierende Ergebnisse des Vorhabens:

In AP 4 erfolgte der Aufbau eines Simulationsmodells mit KMU-spezifischen Fertigungsmerkmalen. Zudem wurden die weiterentwickelten Verfahren sowie die ursprünglichen Fertigungsverfahren in das Modell implementiert. Durch die Variation von Verfahrens- bzw. Prozessparametern wurden verschiedene Simulationsszenarien erzeugt und der Einfluss auf die Energiekosten sowie die logistischen Zielgrößen untersucht, um die Anwendungsgrenzen und Potentiale aufzeigen zu können. Ein Praxistest (AP 5) bei Mitgliedern des PbA konnte aufgrund der momentan noch nicht gegebenen Anwendungsvoraussetzungen (speziell der volatile Strompreis) nicht durchgeführt werden. Jedoch erfolgte eine simulatorische Validierung anhand der in einem Schmiedeunternehmen aufgenommenen Praxisdaten. Ein Praxisleitfaden zur Anwendung wurde auf der Homepage des IPH veröffentlicht.

4. Darstellung der erzielten Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die erzielten Ergebnisse detailliert dargestellt. Die Darstellung ist in die vier Schritte Analyse (AP 1, AP 2), Konzeption (AP 3), Validierung (AP4) und eine kritische Diskussion unterteilt.

4.1 Analyse

Die Analyse umfasst in Kapitel 4.1.1 zunächst eine Recherche über die Zusammensetzung des Strompreises sowie eine Analyse aktueller und zukünftiger Stromtarife von Industrieunternehmen. Daraufhin wird der Einfluss der Fertigungssteuerung auf die Energiekosten herausgestellt. Danach erfolgt die Darstellung der systematischen Auswahl der weiterzuentwickelnden Fertigungssteuerungsverfahren. Die Identifikation energiekostenrelevanter Stellhebel der ausgewählten Fertigungssteuerungsverfahren findet in Abschnitt 4.1.4 statt. Die folgenden Ergebnisse entstammen neben Literaturrecherchen im Wesentlichen aus Interviews mit Mitarbeitern von Energieversorgern, Anbietern von industriellen Stromtarifen und Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses (PA).

4.1.1 Analyse aktueller und zukünftiger Stromtarife

4.1.1.1 Zusammensetzung des Strompreises

Produzierenden Unternehmen handeln mit den Energieversorgern meist Sonderverträge für den Bezug von Strom aus. In Abhängigkeit von der Abnahmemenge, den Nutzungsstunden, Spannungsspitzen sowie der Spannungsebene können besondere Konditionen angeboten werden [DIH12]. Grundsätzlich erhalten industrielle Abnehmer jeweils eine Rechnung vom Netzbetreiber und vom Energieversorger.

Der Netzbetreiber rechnet im Rahmen der Netzentgelte einen Grundpreis für die Bearbeitung und die installierten Messgeräte sowie einen Arbeits- und Leistungspreis ab. Bei einem hohen Anteil an Blindleistung² muss diese ebenso vergütet werden. Diese Netzentgelte stellen dabei das Entgelt für den Energietransport über Übertragungs- und Verteilungsnetze dar, wobei eine Befreiung bzw. Reduzierung dieser Entgelte möglich ist. Der Arbeitspreis fällt für die bezogene elektrische Arbeit an und wird je verbrauchte Kilowattstunde (kWh) bezahlt. Der Leistungspreis, welcher aus einem festen und einem variablen Anteil besteht, wird für die Bereitstellung der Kapazität der Kraftwerke und Netze erhoben. Der feste Leistungspreis wird für den

² Blindleistung ist die elektrische Leistung, welche periodisch magnetische oder elektrische Felder erzeugt. Die Wirkleistung dient dagegen der Umwandlung in beispielsweise mechanische oder thermische Leistung [Krä91]

Anschluss an das Stromnetz verrichtet. Der variable Anteil ergibt sich aus der Multiplikation des Leistungspreises mit der ermittelten maximalen Leistung (Lastspitze) [Kon13].

Die Rechnung des Energieversorgers beinhaltet dagegen nur einen Arbeitspreis, welcher die Kosten für die Erzeugung und den Vertrieb abdeckt. Die Kosten für den Arbeitspreis sind jedoch deutlich höher als die Kosten für den Leistungspreis des Netzbetreibers, um das Mengen- als auch das Strukturrisiko abzudecken. Zudem führt der Energieversorger Umlagen, Steuern, Abgaben und Aufschläge ab und leitet diese an den Staat oder die Netzbetreiber weiter. Diese werden beispielsweise für die Finanzierung und Integration von erneuerbaren Energien gezahlt und sind abhängig von politischen Entscheidungen [Kon13].

4.1.1.2 Strombeschaffung produzierender Unternehmen

Großverbraucher und energieintensive Unternehmen, wie beispielsweise aus der Chemie- oder Zementindustrie, beziehen ihren Strom meist an Großhandelsmärkten. Dieser kann durch bilateralen Stromhandel (OTC³-Markt) als auch beim Börsenhandel (beispielsweise die European Energy Exchange EEX) über eine Lieferung auf Termin, als auch im täglichen (Day-Ahead) oder untertägigen (Intraday oder Hour-Ahead) Spothandel erfolgen. In Terminmärkten werden für einen festen Preis längerfristige Lieferungen vereinbart [Fre07]. Auf dem Spotmarkt wird der Strom für den nächsten Tag zur Optimierung des Verbraucher- und Erzeugerportfolios festgelegt und verkauft, um Ausfälle von Kraftwerksparks oder veränderte Erzeugungsleistung von erneuerbaren Kraftwerkstypen berücksichtigen zu können. Bis zu 45 Minuten (an der Strombörse) oder sogar 15 Minuten (bei außerbörslichen OTC-Handelsplätzen) vor Lieferung kann der Strom eingekauft werden. Die Preise an den Terminmärkten sind in der Regel höher, da so die Volatilitätsrisiken des Spotmarktes ausgesetzt werden können. Ein Vertrieb auf diese Weise ist dem Sachverhalt geschuldet, dass zur Netzstabilität Angebot und Nachfrage übereinstimmen müssen. In der Realität optimieren Großverbraucher ihren Strombezug abhängig von ihrer Risikobereitschaft durch ein Portfolio von Termin- und Spotmarktprodukten [Kon13]. Die Folge dieses Stromhandels, welcher von sehr großen Unternehmen mit hohem Stromverbrauch durchgeführt wird, ist somit ein Strompreis, der sich viertelstündlich unterscheiden kann (siehe Abbildung 1). Die steigende Transparenz wird von Großverbrauchern jedoch häufig als Nachteil angesehen, da durch den börslichen Handel ein Verlust der Marktmacht entstehen kann [Fre07].

Unternehmen die nicht über die technischen und organisatorischen Möglichkeiten eines Portfoliomanagements verfügen, können dieses Preisrisiko jedoch nicht auf-

³ Over the counter

nehmen. Bisher vereinbaren KMU mit ihrem Stromversorger meist über mehrere Jahre einen Tarif, welcher sich aus ein oder zwei Preisstufen zusammensetzt [Kon13]. So ist der Strom während des Tages meist teurer (Hochtarif- oder Peak-Phase) als in der Nacht (Niedertarif- oder Off-Peak-Phase). Die Folge ist ein fehlender Anreiz, kurzfristig die Stromnachfrage an Stromangebot anzupassen.

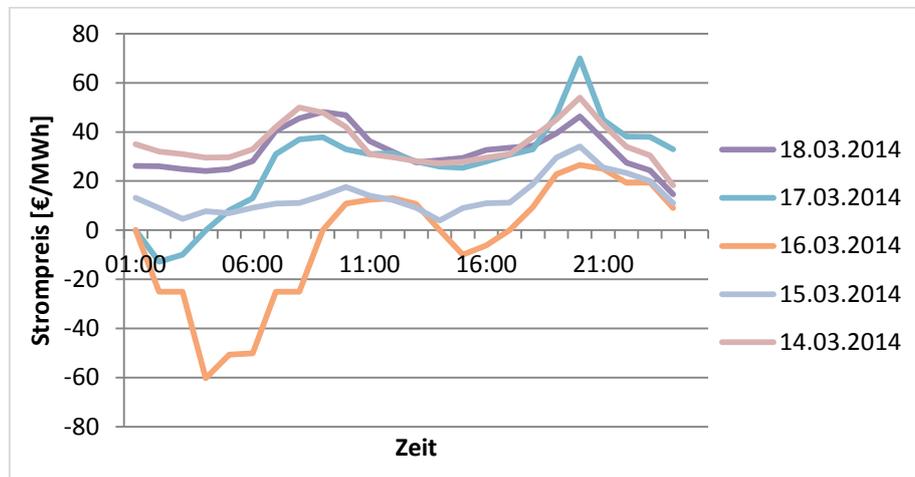


Abbildung 1: Spotmarktpreis an der EEX Leipzig [EEX14]

4.1.1.3 Nachfrageseitiges Energiemanagement

Das übergeordnete betriebliche Energiemanagement (engl. Demand Side Management) kann zum einen über Maßnahmen zur Veränderung der Energieeffizienz als auch über die Nachfragesteuerung erfolgen. Während Energieeffizienzmaßnahmen eine zeitlich unabhängige Reduktion des Verbrauches forcieren, wird bei der Nachfragesteuerung der prognostizierte Lastgang lang- oder kurzfristig beeinflusst [Nab09]. Da die Fertigungssteuerung jedoch keinen Einfluss auf technische Prozesse nehmen kann, wird die Energieeffizienz an dieser Stelle nicht weiter betrachtet. Maßnahmen, welche zur Energienachfragebeeinflussung dienen, werden dabei unter dem Begriff Demand Response zusammengefasst. Eine Klassifizierung der Nachfragesteuerung ist in Abbildung 2 zu finden.

Bietet ein Energieversorger Bonuszahlungen oder Gutschriften an, sofern Energieverbraucher ihre Nachfrage bei Bedarf verschieben, ist von einem direkten, anreizbasierten und kontrolliertem Lastmanagement bzw. Nachfragesteuerung die Rede. Über dezentrale Steuerungen können Anlagen zur Spitzenlastreduktion unmittelbar zu- oder abgeschaltet werden. Dies ist jedoch bei produzierenden Unternehmen aufgrund der geplanten Produktionsprozesse schwer umsetzbar. Im Rahmen von Systemdienstleistungen können Industrieunternehmen Regelleistung über das Zuschalten eigener Blockheizkraftwerke bereitstellen oder durch einen zusätzlichen Verbrauch abnehmen.

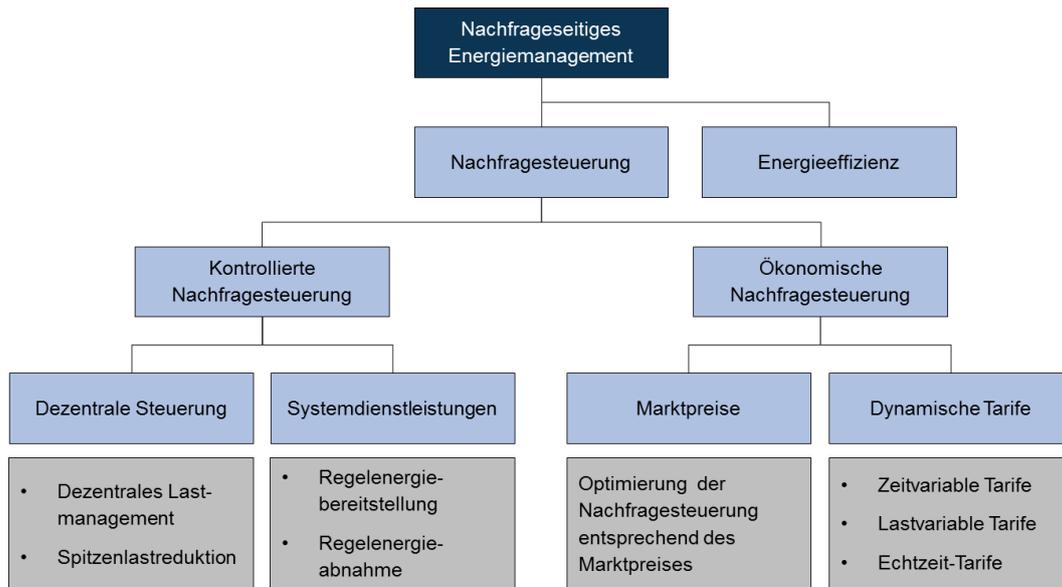


Abbildung 2: Kategorien des Nachfragemanagements [in Anlehnung an Jah13]

Wird eine Lastverschiebung über den Preis ausgelöst, spricht man von indirekten, preisbasierten und ökonomischen Maßnahmen des Lastmanagements bzw. der Nachfragesteuerung. Über reale Marktpreise werden Nachfragesteuerungen bewirkt. Dabei kann ein Strombezug in Echtzeit an Großhandelsmärkten oder die über eine atypische Netznutzung erfolgen. Dynamische Tarifmodelle, wie last- oder zeitvariable Tarife erwirken eine Nachfragesteuerung über Preismechanismen der Energielieferanten und sind nicht so risikohaft wie der Handel an der Strombörse. Dabei spiegelt der variable Strompreis die realen Kosten der Stromproduktion wieder. Aufgrund der hohen Bedeutung für produzierende kleine und mittlere Unternehmen werden die dynamischen Tarifmodelle im Zuge der ökonomischen Nachfragesteuerung genauer erläutert.

4.1.1.4 Dynamische Tarifmodelle

Preisreagible Märkte sollen auf Beschluss der EU-Kommission von Ende 2012 [EnE12] verstärkt über dynamische Tarifmodelle umgesetzt werden. In Deutschland haben diese bereits Einzug in das Energiewirtschaftsgesetz gefunden [EnW14], um der dezentralen sowie volatilen Erzeugung der erneuerbaren Energien gerecht zu werden. Ziele dieser dynamischen Tarife sind die Beteiligung an Mengen- und Strukturrisiken sowohl aus Sicht des Erzeugers als auch Energiekosteneinsparungen durch Lastgangmodifikationen aus Kundensicht.

Das Energiewirtschaftsgesetz unterscheidet dabei last- und zeitvariable Tarife. Bei lastvariablen Tarifen hängt der Bezugspreis für Strom vom Verbrauch ab. Dabei kann zwischen Netz-, System- oder Kundenlast unterschieden werden, wobei die Kundenlast die häufigste Erscheinungsform ist. Zudem ist eine Unterscheidung zwischen Tages-, Monats- oder Jahreslast möglich. Mögliche Erscheinungsformen sind dabei

lastbegrenzte und -variable Tarife. Bei lastbegrenzten Tarifen gilt ein Preis nur bis zu einer bestimmten Maximallast. Bei Überschreiten wird die Stromversorgung bis zum Verstreichen einer gewissen Frist unterbrochen. Bei einem lastvariablen Tarif mit zwei Preisstufen wird für die Zeit der Überschreitung einer definierten Lastschwelle ein höherer Preis abgerechnet [Nab09]. Wird die Lastschwelle unterschritten wird der ursprüngliche Preis berechnet. Der kumulierte Verbrauch wird bei einem lastvariablen Monatstarif mit drei Preisstufen gemessen (siehe Abbildung 3). Bei Überschreitung einer definierten Verbrauchsschwelle wird ein höherer Preis (Stufe 2) gezahlt. Wird dagegen die zweite Verbrauchsschwelle erreicht, muss ein wiederum erhöhter Preis der Stufe 3 gezahlt werden [Nab09]. Lastvariable Tarife führen somit zu einer Reduktion der Stromnachfrage.

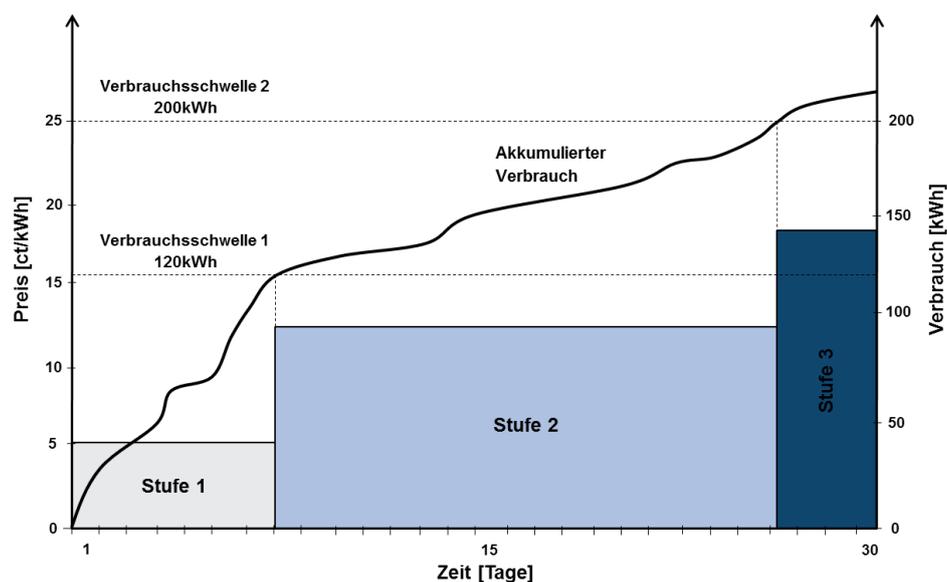


Abbildung 3: Lastvariablen Monatstarif mit drei Preisstufen [in Anlehnung an Nab09]

Zeitvariable Tarifmodelle sind ein deutlich häufigerer Typus, da sie durch ihre Gestalt eine Anpassung von Stromangebot und -nachfrage ermöglichen und damit die realen Erzeugungskosten abbilden können. Dies ist auch der Grund, warum von Energieversorgern vermehrt Tarife dieser Art angeboten werden.

In Abhängigkeit von der Zeit variiert der Arbeitspreis und kann somit zur Lastverschiebung beitragen. Die wichtigsten Modelle, die in Feldstudien bereits Praxistauglichkeit bewiesen haben sind Time-Of-Use (TOU) sowie Critical Peak Pricing (CPP) [Nab09, Far09].

Beim TOU-Tarif orientiert sich der Strompreis an der zeitlichen Struktur der Nachfrage. Dafür wird der Tag anhand von historischen Lastkurven in unterschiedliche Zeitblöcke (meist mehrere Stunden) eingeteilt, in denen konstante Strompreise gelten. Die Preise können dabei im Tages- oder Wochenverlauf als auch saisonal schwanken [Far09]. Neben zweistufigen Modellen mit einem Peak- und einem Off-Peak-

Preis, welche in Deutschland bereits über Hoch- und Niedertarifzonen umgesetzt werden, kann ein Shoulder-Preis eingeführt werden. Ein Beispiel ist in der Abbildung 4 zu erkennen. Da die Tarife jedoch nur ein- bis zweimal pro Jahr angepasst werden, weisen sie eine geringe Aktualität und Preisgranularität auf. Eine Anpassung von Produktion und Nachfrage sowie ein Strompreis, welcher den aktuellen Produktionskosten entspricht, werden daher nicht verfolgt [Bor05].

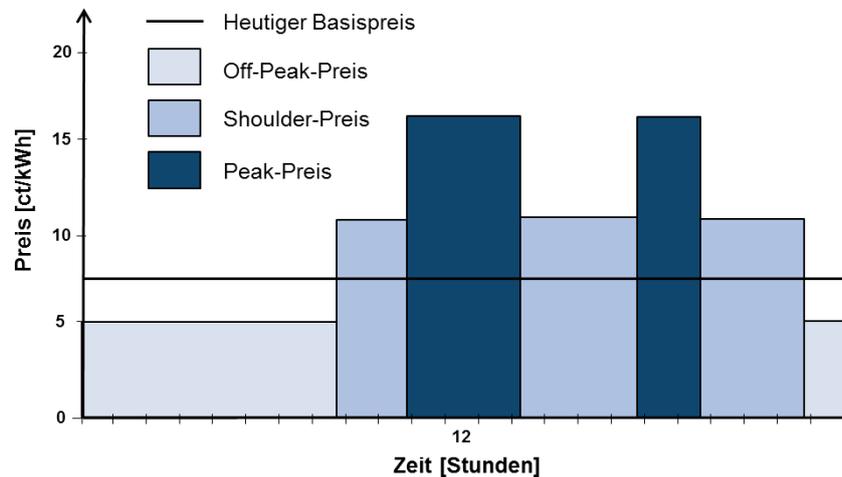


Abbildung 4: Dreistufiger Time-Of-Use-Tarif

Um die ungewisse Erzeugung von erneuerbaren Energien ausreichen berücksichtigen zu können, wird beim Critical-Peak-Price 24 Stunden vor Eintreten ein Peak-Event bekannt gegeben. Zu Zeiten dieses Events kann der Preis bis zu achtmal so hoch sein wie außerhalb des Peak-Preises (Abbildung 5).

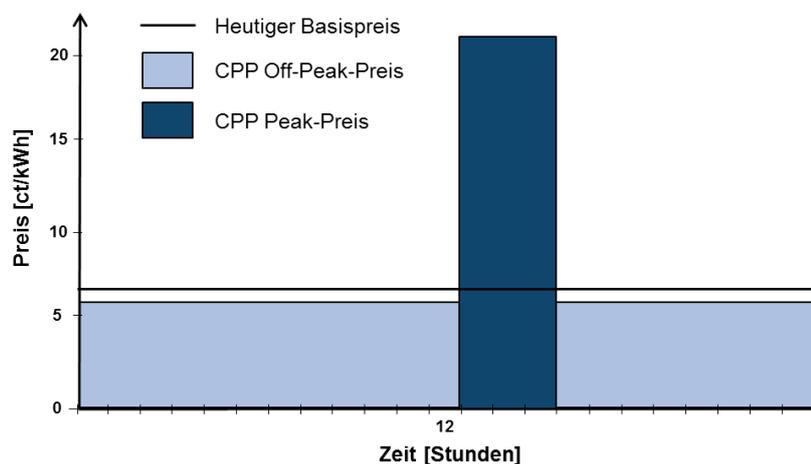


Abbildung 5: Critical-Peak-Price-Tarif [Far09]

Unternehmen haben somit einen Tag Zeit, um mit ihren Produktionsprozessen auf die erhöhten Preise zu reagieren. Jedoch ist die Peak-Zeit auf ein Prozent der Jahresnutzungsstunden beschränkt. Ebenso wird eine Mindestdauer des Peak-Events festgelegt, um die relativen Reaktionskosten gering zu halten [Far09].

Grundsätzlich ist festzustellen, dass die dargestellten dynamischen Tarifmodelle bisher in Industrieunternehmen nahezu keine Anwendung finden und bisher lediglich von einigen amerikanischen Privathaushalten angewendet und validiert werden [Nab09]. Volatile Strompreise für Industrieunternehmen stellen somit ein Zukunftsszenario dar, welches jedoch eine Grundvoraussetzung für die zu entwickelnden Verfahren darstellt. Die neuen Fertigungssteuerungsverfahren werden daher so entwickelt, dass jeder Strompreisverlauf (HT/NT-Tarif, TOU, CPP, realer Preis der Strombörse) integriert und berücksichtigt werden kann.

4.1.2 Einfluss der Fertigungssteuerung auf die Energiekosten

Dem Forschungsbericht liegen zwei grundsätzliche Annahmen zugrunde. Zum einen muss ein volatiler Strompreis (siehe Abschnitt 4.1.1) vorliegen. Zum anderen müssen sich die mittleren elektrischen Leistungen der Aufträge an Arbeitssystemen von Auftrag zu Auftrag unterscheiden. Um die zweite Annahme darzulegen, wurden bei einem Schmiedeunternehmen, welches Mitglied des projektbegleitenden Ausschusses ist, an einem Induktionsofen über elektrische Messgeräte die Wirkleistung über einen Zeitraum von 2 Wochen gemessen. Gleichzeitig wurden Auftragsdaten- und Maschinendaten wie die Losgröße, das Material, die Bauteilgröße, Start- und Endzeit der Bearbeitung sowie Störungen aufgenommen.

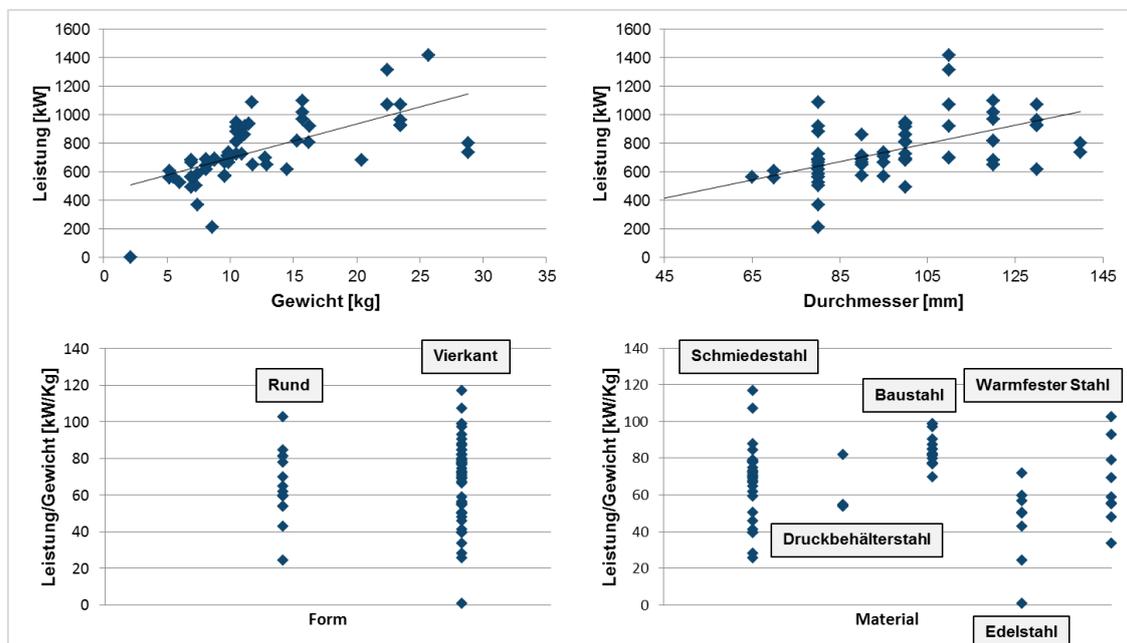


Abbildung 6: Zusammenhang zwischen Fertigungsauftragsmerkmalen und der mittleren elektrischen Leistung an einem Induktionsofen

Nach einer anschließenden Auswertung und Berechnung einer mittleren Wirkleistung für jeden Auftrag konnte herausgestellt werden, dass mit steigendem Bauteilgewicht die mittlere elektrische Leistung zur Erwärmung ansteigt (Abbildung 6). Ebenso

verhält sich die elektrische Leistung bei einer Zunahme des Durchmessers des zu erwärmenden Stangenmaterials. Ein systematischer Einfluss der Form des Stangenmaterials (rund/viereckig) oder des Stahls konnte jedoch nicht festgestellt werden.

Zur Einbindung der Energiekosten in den Kontext der Fertigungssteuerung wurden alle Einflussfaktoren auf die Energiekosten identifiziert. Da sich die Energiekosten aus den Energiepreisen, welche bereits im vorangegangenen Abschnitt 4.1.1 beschrieben wurden, und dem Energieverbrauch zusammen setzen, werden im Folgenden die Einflüsse auf den Lastgang einer Produktionsanlage (zeitlicher Energieverbrauch) im Fokus stehen.

Der Energieverbrauch einer Anlage ist abhängig von den Eigenschaften der Produktionsanlage und den Merkmalen der auf der Anlage bearbeiteten Aufträge. Zudem treten Umwelteinflüsse auf, welche jedoch nur schwer beeinflussbar sind. Die jeweiligen Einflussfaktoren sind in der Abbildung 7 zu erkennen.

Energieverbrauch einer Produktionsanlage		
Produktionsanlage	Auftrag	Umwelt
Leistungsmerkmale	Auftragsmerkmale	<ul style="list-style-type: none"> • Luftfeuchtigkeit • Umgebungstemperatur • Störungen • Anzahl und Qualifikation der Mitarbeiter
<ul style="list-style-type: none"> • Maximale und minimale Leistung • Grundlast • Übergangs-, Rüst-, und Hochlaufzeitpunkt • Lastverlauf • Energieeffizienz 	<ul style="list-style-type: none"> • Mengen • Reihenfolgen • Termine • Auftragszeiten • Auftragspezifische Leistungsmerkmale 	
Weitere Merkmale	Produktmerkmale	
<ul style="list-style-type: none"> • Art, Größe und Funktionsweise • Betriebszustände • Prozesskräfte • Instandhaltungs- und Wartungsintervalle • Auslastung 	<ul style="list-style-type: none"> • Größe • Gewicht • Material • Geometrie • Qualitätsanforderungen 	

Abbildung 7: Einflussfaktoren auf den zeitlichen Energieverbrauch einer Produktionsanlage

Art, Größe und Funktionsweise und die daraus resultierenden Prozesskräfte der Produktionsanlage beeinflussen die Leistungswerte und damit den Energieverbrauch erheblich. Charakteristisch für den Lastgang sind vor allem maximale und minimale Leistungen während der Bearbeitung sowie die Grundlast während des Rüstens. Auch die Zeitpunkte der jeweiligen Betriebszustände sowie die Energieeffizienz haben einen großen Einfluss. Gerade die Energieeffizienz kann durch fehlende oder unzureichende Wartung und Instandhaltung beeinträchtigt werden. Der Produktionsauftrag beeinflusst mit seinem Umfang, welcher durch Losgrößen oder Chargen abgebildet wird, und den Auftragszeiten den zeitlichen Lastgang. Auch die Auftragsreihenfolgen mit den daraus resultierenden Start- und Endterminen nehmen Einfluss. Wie im vorherigen Kapitel erläutert, wirkt zudem das zu produzierende Produkt mit

seinen Eigenschaften (Größe, Geometrie, Gewicht) auf den Energieverbrauch ein. Bei manchen Anlagen ist zudem die Luftfeuchtigkeit oder die Umgebungstemperatur ein Einflussfaktor auf die Leistung der Anlage.

In einer Einflussmatrix wurden nun die genannten Einflussfaktoren gegenüber aufgetragen. Über eine Quantifizierung der Einflussstärke von den auf der X-Achse aufgetragenen Einflussgrößen gegenüber den gleichen auf der Y-Achse aufgetragenen Einflussgrößen können die kumulierten Einflussstärken sowie die kumulierte Beeinflussbarkeit bestimmt werden. Das Ergebnis ist in der folgenden Abbildung 8 dargestellt.

Dabei ist zu erkennen, dass der Lastverlauf eine hohe Beeinflussbarkeit aufweist, jedoch selbst nur wenig Einfluss nimmt. Dies ist dem Sachverhalt geschuldet, dass die Energiekosten in dieser Betrachtung nicht berücksichtigt werden. Für den weiteren Verlauf sind besonders die Faktoren im 2. Quadranten relevant. Die kritischen Faktoren, wie die Start- und Endtermine sowie die Auftragsreihenfolge, haben einen hohen Einfluss, sind jedoch selbst einer großen Beeinflussbarkeit ausgesetzt. Eine Beschleunigung von Entwicklungen ist möglich, wobei unkontrollierte Rückkopplungen erfolgen können. Werden die Nebenwirkungen jedoch systematisch abgeschätzt, ist ein Systemeingriff möglich [Aum09]. Relevante Größen wie die Produktmerkmale haben ebenso eine hohe Einflussstärke, können jedoch von Seiten der Fertigungssteuerung kaum beeinflusst werden.

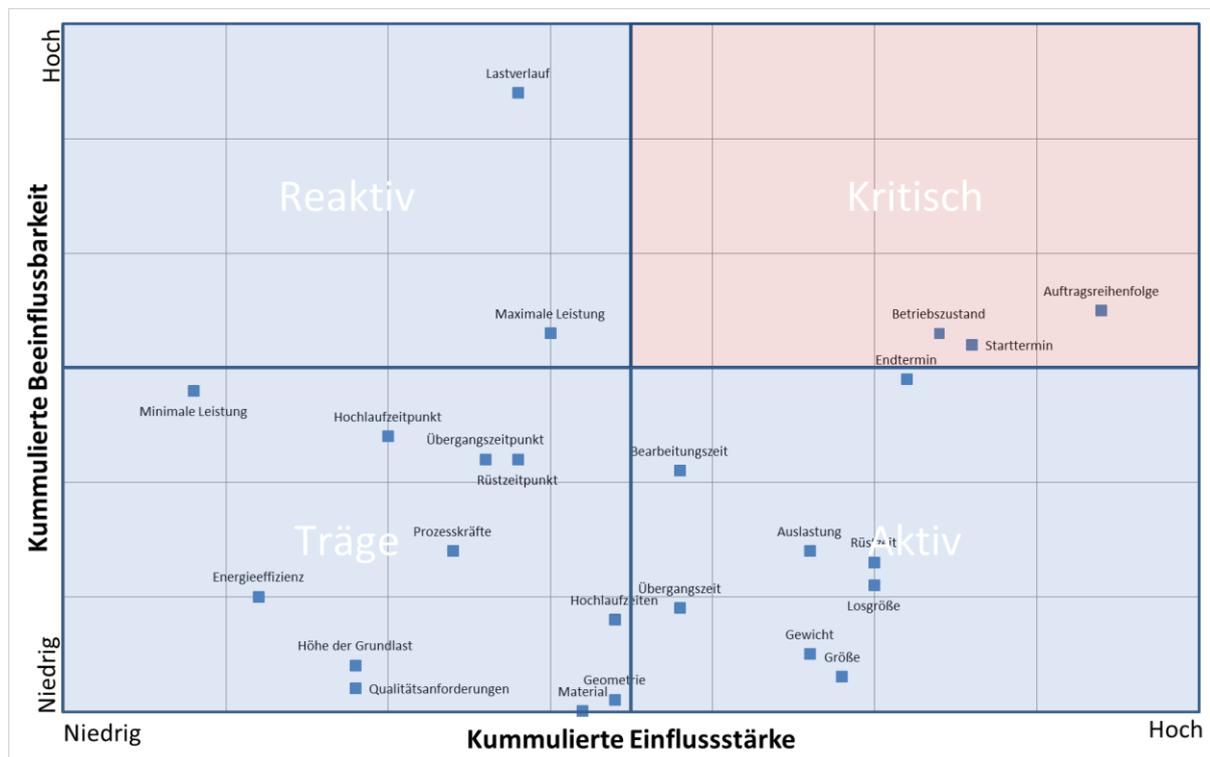
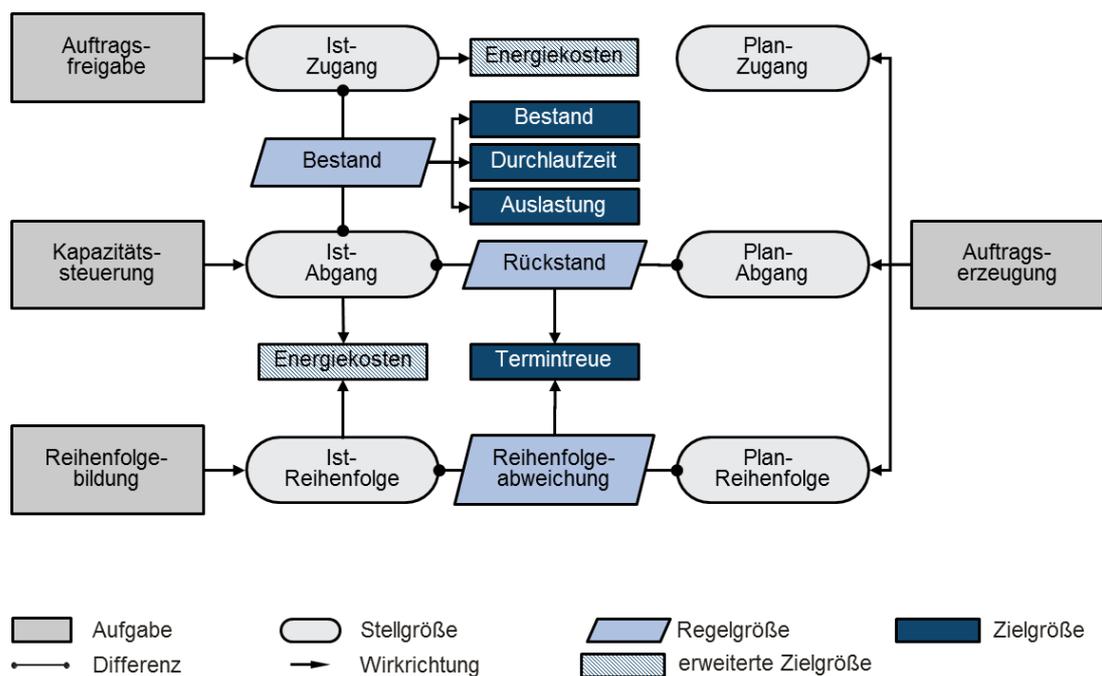


Abbildung 8: Einflussmatrix der Fertigungssteuerung

Die genannten kritischen Einflussfaktoren finden sich in LÖDDINGS Modell der Fertigungssteuerung wieder [Löd08]. Dieses bildet qualitative Wirkzusammenhänge zwischen den Aufgaben, Stellgrößen, Regelgrößen und Zielgrößen der Fertigungssteuerung ab. Die logistischen Zielgrößen (Bestand, Durchlaufzeit, Auslastung, Termintreue) werden von den Regelgrößen beeinflusst, welche sich wiederum aus der Differenz von zwei Stellgrößen ergeben. Die Stellgrößen Ist-Zugang, Ist-Abgang und Ist-Reihenfolge stellen die in der vorherigen Abbildung ermittelten starken Einflussgrößen auf den zeitlichen Energieverbrauch, also den Lastverlauf, dar. Eine dementsprechende Erweiterung des Modells ist in der Abbildung 9 zu erkennen.



**Abbildung 9: Erweiterung des Modells der Fertigungssteuerung um Energiekosten
[in Anlehnung an Löd08]**

Der Ist-Zugang und damit der Starttermin können höhere Energiekosten verursachen, sofern ein Auftrag mit einem hohen spezifischen Energiebedarf zum Zeitpunkt hoher Energiepreise freigegeben wird. Gleichzeitig können die Energiekosten reduziert werden, wenn durch den Ist-Abgang zusätzliche Kapazität zur Produktion von energieintensiven Aufträgen in Zeiten niedriger Energiepreise und nicht zu Zeiten hoher Energiepreise geschaffen wird. Die Ist-Reihenfolge beeinflusst die Energiekosten, sofern ein Wechsel bspw. von einem Hoch- zu einem Niedertarif bevorsteht. So kann durch die Auswahl von energieintensiven Aufträgen Einfluss auf die Energiekosten genommen werden. Die Auftragserzeugung generiert hingegen aus Lager und Kundenaufträgen Fertigungsaufträge und legt somit Plan-Termine für die Bearbeitung, die Losgröße und darüber die Bearbeitungsdauer fest [Löd08]. Da eine Einhaltung der Plan-Termine zu diesem Planungszeitpunkt aufgrund häufig unvermeidlicher Störungen nicht gewährleistet sind, ist der Einfluss der Auftragserzeugung

auf die Energiekosten sehr gering und wird somit im Folgenden vernachlässigt. Grundlage der Erweiterung des Modells von LÖDDING ist ein qualitatives Wirkmodell, in dem die Beeinflussung der Energiekosten durch die vier Aufgaben der Fertigungssteuerung (Auftragserzeugung, Auftragsfreigabe, Reihenfolgebildung, Kapazitätssteuerung) detailliert herausgestellt ist (Abbildung 42 im Anhang).

4.1.3 Auswahl der zu erweiternden Fertigungssteuerungsverfahren

Vor dem Hintergrund eines auftragsfertigenden KMU wurden die gängigen Verfahren der Fertigungssteuerung hinsichtlich mehrerer Kriterien auf ihre Eignung in bestimmten Fertigungsumgebungen anhand der Literatur untersucht.

Aufgrund der Arbeitsintensität und der geringen Arbeitsteilung sind die Produktionen von KMU häufig nach dem Werkstattprinzip organisiert, woraus sich eine hohe Materialflusskomplexität herleitet. Aufgrund der Deckung individualisierter Nachfragen in einem schmalen Marktsegment stellen KMU meist Einzel- oder Kleinserien mit einer hohen Variantenanzahl her [Pfo06]. Zudem weisen KMU eine hohen Schwankung an Kapazitätsbedarfen auf. Aufbauend auf diesen Fertigungsmerkmalen wurden die gängigen Fertigungssteuerungsverfahren auf ihre Eignung unter den genannten Bedingungen untersucht.

Als Verfahren der Auftragsfreigabe eignen sich laut der Untersuchung vor allem die Belastungsorientierte Auftragsfreigabe (BOA) und Workload Control. Nach Gesprächen mit Experten werden die Verfahren jedoch nur sehr selten angewendet und weisen eine hohe Komplexität auf. Aus diesem Grund wurde die häufig angewendete Auftragsfreigabe nach Termin ausgewählt, bei der die Aufträge in die Fertigung freigegeben werden, deren Plan-Starttermin erreicht ist.

Als Verfahren der Kapazitätssteuerung findet die Rückstandsregelung häufig Anwendung bei KMU, welche bei dem Erreichen eines Grenzurückstandes⁴ eine Kapazitätsanpassung auslöst.

Die Verfahren zur Reihenfolgebildung eignen sich grundsätzlich alle, jedoch ist eine Weiterentwicklung der natürlichen Reihenfolgeregel First-in-First-Out (FIFO) nicht möglich, ohne den ursprünglichen Charakter zu verändern. Es wurde die geringste Restschlupfregel ausgewählt, da diese die Terminabweichung reduziert und somit die wichtigste logistische Zielgröße Termintreue verfolgt.

⁴ Rückstand: Abweichung des Ist-Abganges einer Fertigung oder eines Arbeitssystems vom Plan-Abgang

4.1.4 Identifikation energiekostenrelevanter Stellhebel der ausgewählten Fertigungssteuerungsverfahren

Im Folgenden werden die Auswirkungen der ausgewählten Fertigungssteuerungsverfahren über drei qualitative Wirkmodelle analysiert und somit Stellhebel für eine anschließende Erweiterung identifiziert. Die Wirkmodelle sind im Anhang (Abbildungen 42-45) zu finden.

Der Eingang eines Fertigungsauftrages in die Fertigung im Rahmen der Auftragsfreigabe bedeutet nicht dessen direkte Bearbeitung am Arbeitssystem. Die Warteschlange am Arbeitssystem und die Transportzeit (Übergangszeiten) bestimmen den Startzeitpunkt der Bearbeitung. Zudem können Störungen und Reihenfolgevertauschungen, nach der Freigabe eines Auftrages, den geplanten Bearbeitungszeitraum am Arbeitssystem verändern. Dadurch ist die Beeinflussung des zeitlichen Energiebedarfs durch die Auftragsfreigabe nach Termin eher gering. Je größer die Warteschlangen an den Arbeitssystemen sind, desto geringer ist zudem der Einfluss der Auftragsfreigabe nach Termin auf die Energiekosten, da der geplante Starttermin (Grundlage für die Berechnung der Energiekosten zum Zeitpunkt der Freigabe) am Arbeitssystem mit einer höheren Wahrscheinlichkeit nicht eingehalten wird. Ein möglicher Stellhebel stellt jedoch die Sortierung im Rahmen der Freigabe dar. Beim unveränderten Freigabeverfahren werden die Aufträge nach Plan-Starttermin freigegeben. Ist für mehrere Aufträge der Plan-Starttermin erreicht, können durch eine zusätzliche Sortierung die Ist-Starttermine am Arbeitssystem und damit die Energiekosten zielgerichtet beeinflusst werden [Löd08].

Die Reihenfolgebildung nach geringstem Restschlupf legt, wie jede andere Reihenfolgeregel, kurzfristig den Zeitpunkt der Bearbeitung eines Fertigungsauftrages an einem Arbeitssystem fest [Löd08]. An diesem entstehen maßgeblich die Energiekosten in der Produktion. Somit hat das Verfahren bzw. die Reihenfolgebildung allgemein einen großen Einfluss auf den zeitlichen Energiebedarf. Die Höhe des Einflusses ist abhängig von der Anzahl der Aufträge in der Warteschlange, deren Bearbeitungsdauer und deren Unterschied im Energiebedarf. Je mehr Aufträge in der Warteschlange sind, desto größer ist die mögliche zeitliche Beeinflussung des Energieverbrauchs durch Reihenfolgevertauschungen. Ein direkter Stellhebel ist nicht zu identifizieren, ohne den Verfahrenscharakter zu ändern. Jedoch kann die Reihenfolgebildung nach geringstem Restschlupf in eine zu entwickelnde energiekostenorientierte Reihenfolgebildung integriert werden.

Die Kapazität eines Arbeitssystems hat Einfluss auf dessen Energiebedarf in einem bestimmten Betrachtungszeitraum. Durch die kurzfristige Steuerung der Kapazitäten beeinflusst die Kapazitätssteuerung nach der Rückstandsregelung den zeitlichen Energiebedarf der Fertigung. Die Maßnahmen, die zur Kapazitätsänderung gewählt werden, beeinflussen maßgeblich, wie stark die Rückstandsregelung auf die Ener-

giekosten einwirkt. Eine Änderung der Betriebsmittelintensität kann den Energieverbrauch am Arbeitssystem kurzfristig beeinflussen. Auch Überstunden an einem Arbeitssystem führen zu einer Erhöhung des Energiebedarfs. Die Rückstandsregelung legt zudem fest, wann die gewählte Maßnahme und somit der veränderte Energiebedarf anfällt. Abhängig davon, wie flexibel dieser Zeitraum gewählt werden kann, ist eine gezielte Steuerung der Energiekosten durch die Rückstandsregelung denkbar. Der energiekostenrelevante Stellhebel ist hierbei der Zeitpunkt der Maßnahme zur Kapazitätsveränderung [Löd08].

4.2 Konzeption

Die Konzeption umfasst die Weiterentwicklung der Verfahren zu energiekostenorientierten Fertigungssteuerungsverfahren. Dazu erfolgen in Abschnitt 4.2.1 zunächst die Beschreibung des Aufbaus und des Vorgehens im Rahmen der Auftragsfreigabe nach Termin sowie der energiekostenorientierten Auftragsfreigabe nach Termin. Abschnitt 4.2.2 beinhaltet die Darstellung der Reihenfolgeregel geringster Restschlupf sowie der energiekostenorientierten Reihenfolgebildung. Die energiekostenorientierte Rückstandsregelung sowie die klassische Rückstandsregelung werden in Abschnitt 4.2.3 vorgestellt. Für alle drei weiterentwickelten Verfahren werden zudem die erwarteten Anwendungsvoraussetzungen beschrieben und diese zusammen mit den ereignisgesteuerten Prozessketten der Fertigungssteuerungsverfahren (Abbildung 46-50 im Anhang) in einen Leitfaden zur Anwendung integriert.

4.2.1 Energiekostenorientierte Auftragsfreigabe

Auftragsfreigabe nach Termin

Die Auftragsfreigabe nach Termin ist ein weit verbreitetes Verfahren zur Freigabe von Aufträgen. Hauptgrund für die weite Verbreitung ist dessen Einfachheit. Voraussetzung für das Verfahren ist eine Produktionsplanung, welche für alle Kundenaufträge die Plan-Starttermine ermittelt. Die Aufträge werden in einer Liste nach Plan-Starttermin sortiert und der Fertigungssteuerung zur Verfügung gestellt. Wird ein Termin erreicht oder überschritten, so gibt die Fertigungssteuerung den entsprechenden Auftrag frei. Zwischen Auftragsfreigabe und Fertigung findet keinerlei Informationsaustausch statt. Dadurch kann die Auftragsfreigabe nach Termin die Bestände vor den Arbeitssystemen nicht regulieren und keinen Belastungsabgleich durchführen. Dies ist nur während der Produktionsplanung durch die Wahl der Plan-Starttermine möglich. Daher ist eine sorgfältige Produktionsplanung und ein hinreichendes Maß an Kapazitätsflexibilität für die Auftragsfreigabe nach Termin besonders wichtig [Löd08].

Energiekostenorientierte Auftragsfreigabe nach Termin

Wie die Auftragsfreigabe nach Termin (AnT) gibt die energiekostenorientierten Auftragsfreigabe nach Termin (EAnT) die Aufträge mit erreichtem Plan-Starttermin frei. Dabei werden die Aufträge in einer Reihenfolge freigegeben, die zur Senkung der Energiekosten am ersten Arbeitssystem führt.

Von allen Aufträgen, deren geplanter Starttermin erreicht ist, wird der Auftrag mit dem niedrigsten Prioritätswert Pr_n als Erstes in die Fertigung freigegeben. Im Folgenden werden für die verbliebenen Aufträge die Prioritäten erneut berechnet und erneut der Auftrag mit dem niedrigsten Prioritätswert Pr_n freigegeben. Dies geschieht solange, bis alle Aufträge, deren Plan-Starttermine erreicht sind, freigegeben sind.

Der Prioritätswert berechnet sich aus der mittleren (variablen und fixen) Leistungsaufnahme $\bar{P}_{n,m}$ am ersten Arbeitssystem für den betrachteten Auftrag n sowie der Strompreisdifferenz aus dem durchschnittlichen Strompreis während der Auftragsbearbeitung $\bar{k}_{n,m}$ (auftragsspezifischer Energiepreis) und dem durchschnittlichen Strompreis (rollierender Median) \tilde{k} über einen bestimmten Betrachtungszeitraum $T_{\tilde{k}}$. Der Betrachtungszeitraum hängt dabei von den Strompreisprognosen und der mittleren Bearbeitungszeit eines Auftrages ab. Der Betrachtungszeitraum muss mindestens der mittleren Bearbeitungszeit der Aufträge am ersten Arbeitssystem entsprechen. Sind keine Strompreisprognosen vorhanden oder haben diese eine schlechte Qualität, ist der Median aus historischen Daten zu bestimmen und als konstant anzunehmen.

Um für eine bessere Vergleichbarkeit Pr_n -Werte von 0 bis 1 zu erzeugen, wird der Zähler in Gleichung (1) über die maximale durchschnittliche Leistung sowie der maximalen Strompreisdifferenz gegenüber dem Median-Strompreis $\tilde{k} - k_{min}$ im Nenner normiert. Dabei wird auf die maximale durchschnittliche elektrische Leistung am Arbeitssystem $\bar{P}_{m,max}$ sowie den maximalen und minimalen Strompreis k_{max} bzw. k_{min} zurückgegriffen. Das Ergebnis ist der Prioritätswert, der somit die relativen Energiekosten des Auftrages darstellt:

$$Pr_n = \begin{cases} 1 - \frac{\bar{P}_{n,m} * (\tilde{k} - \bar{k}_{n,m})}{\bar{P}_{m,max} * (\tilde{k} - k_{min})} & \text{für } \bar{k}_{n,m} < \tilde{k} \\ \frac{\bar{P}_{n,m} * (\bar{k}_{n,m} - \tilde{k})}{\bar{P}_{m,max} * (k_{max} - \tilde{k})} & \text{für } \bar{k}_{n,m} \geq \tilde{k} \end{cases} \quad (1)$$

mit $n \in N$ Auftrag dessen Plan-Starttermin erreicht ist [-]

$m \in M$ Arbeitssystem des ersten Arbeitsvorganges [-]

Pr_n Prioritätswert [-]

$\bar{P}_{n,m}$	durchschnittliche elektrische Leistungsaufnahme von Auftrag n an Arbeitssystem m [kW]
$\bar{P}_{m,max}$	Maximale durchschnittliche elektrische Leistungsaufnahme an Arbeitssystem m [kW]
$\bar{k}_{n,m}$	Auftragspezifischer Energiepreis - durchschnittliche Strompreis für die Bearbeitung des Auftrages n an Arbeitssystem m [ct/kWh]
\tilde{k}	Rollierender Median des Strompreises im Betrachtungszeitraum $T_{\tilde{k}}$ [ct/kWh]
k_{max}	Maximaler Strompreis im Betrachtungszeitraum [ct/kWh]
k_{min}	Minimaler Strompreis im Betrachtungszeitraum [ct/kWh]

Jedoch ist zu unterscheiden, ob der auftragspezifische Energiepreis im Verhältnis zum durchschnittlichen Energiepreis gerade günstig ($\bar{k}_{n,m} < \tilde{k}$) oder teuer ($\bar{k}_{n,m} \geq \tilde{k}$) ist. Durch die Gestaltung der Formel erhält ein Auftrag mit einer höheren durchschnittlichen Leistung im Falle eines im Verhältnis günstigen Energiepreises einen niedrigeren Prioritätswert und wird somit bevorzugt bearbeitet. Im Falle eines im Verhältnis zum durchschnittlichen Energiepreis hohen auftragspezifischen Energiepreises erhalten Aufträge mit einer geringeren elektrischen Leistung einen geringeren Prioritätswert. Somit werden zu Zeiten hoher Energiepreise Aufträge mit einer geringen elektrischen Leistung und umgekehrt priorisiert.

$\bar{k}_{n,m}$ berechnet sich aus dem mit dem Anteil an der Bearbeitungszeit gewichteten Strompreisen, in denen für den betrachteten Auftrag elektrische Leistung anfällt. Unter der Voraussetzung, dass die elektrische Leistungsaufnahme der Arbeitssysteme für einen Auftrag näherungsweise konstant ist, berechnet sich der auftragspezifische Energiepreis eines Auftrags nach Gleichung 2:

$$\bar{k}_{n,m} = \frac{\int_{t_{start,n,m}}^{t_{ende,n,m}} K(t) dt}{BZ_{n,m}} \quad (2)$$

mit $n \in N$	Auftrag dessen Plan-Starttermin erreicht ist [-]
$m \in M$	Arbeitssystem des ersten Arbeitsvorganges [-]
$BZ_{n,m}$	Bearbeitungszeit des Auftrags n an Arbeitssystem m [h]
$K(t)$	Strompreis zum Zeitpunkt t [ct/kWh]
$t_{start,n,m}$	Beginn der Auftragsbearbeitung von Auftrag n an Arbeitssystem m
$t_{ende,n,m}$	Ende der Auftragsbearbeitung von Auftrag n an Arbeitssystem m

Der Bearbeitungsbeginn eines Auftrages $t_{start,n,m}$ ist dabei der Planungszeitpunkt erweitert um die Transportzeit zum ersten Arbeitssystem zuzüglich der Zeit, die der Auftrag vor diesem warten muss (durch Bearbeitung und Rüsten anderen Aufträge

bzw. Rüsten für den eigenen Auftrag). Das Bearbeitungsende eines Auftrages ergibt sich aus der Summe des Bearbeitungsbeginnes und der Bearbeitungszeit des Auftrages:

$$t_{start,n,m} = TP_0 + WIP_m + BZ_{Rest,m} + ZTR_{n,m} + ZR_{n,m} \quad (3)$$

$$t_{ende,n,m} = t_{start,n,m} + BZ_{n,m} \quad (4)$$

mit	TP_0	Planungszeitpunkt [h]
	WIP_m	Direkter Bestand (Bearbeitungs- sowie Rüstzeiten der wartenden Aufträge) vor dem Arbeitssystem m [h]
	$BZ_{Rest,m}$	Restbearbeitungszeit des aktuell bearbeiteten Auftrages [h]
	$ZR_{n,m}$	Rüstzeit für Auftrag n an Arbeitssystem m [h]
	$ZTR_{n,m}$	Transportzeit von Auftrag n an Arbeitssystem m [h]

Betrachtet wird im folgenden Beispiel der freizugebende Auftrag 3. Befindet sich der Auftrag 1 noch für 3 Stunden in Bearbeitung und der Auftrag 2 in der Warteschlange des ersten Arbeitssystems, ist der Zeitpunkt der Bearbeitung für den betrachteten Auftrag 3 zum Zeitpunkt 8 Stunden (Abbildung 10). Bei einer Bearbeitungszeit von 4 Stunden von Auftrag 3 ist sein Endtermin bei 12 Stunden. Der mittlere auftragspezifische Energiepreis von Auftrag 3 ergibt sich somit zu $(1 \text{ h} \times 6,5 \text{ cent/kWh} + 3 \text{ h} \times 4 \text{ cent/kWh}) / 4 \text{ h} = 4,625 \text{ cent/kWh}$.

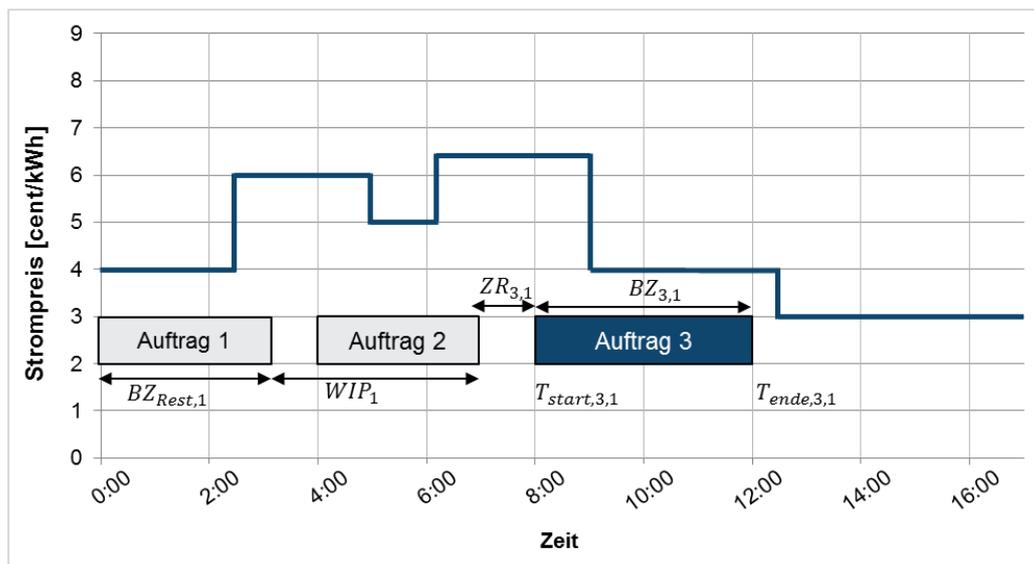


Abbildung 10: Beispiel für die Berechnung des auftragspezifischen Energiepreises

Anwendungsvoraussetzungen

Damit die energiekostenorientierte Auftragsfreigabe nach Termin in der Lage ist, Energiekosten zu senken, müssen einige Voraussetzungen erfüllt sein. Zunächst müssen *mindestens zwei Aufträge* mit erreichtem Plan-Starttermin vorliegen. Weiterhin müssen *Unterschiede in der elektrischen Leistung* der Aufträge am ersten Arbeitssystem bestehen. Ebenso sollte das erste Arbeitssystem energiekritisch sein, da das Verfahren ansonsten seine energiekostenoptimierende Funktion verliert. *Strompreisschwankungen* sind eine Grundvoraussetzungen in diesem Forschungsprojekt. Ebenso sollten *Strompreisprognosen* verfügbar sein. Als weitere Anforderung ergibt sich, dass die *Bearbeitungszeiten der Aufträge pro Arbeitssystem möglichst kurz* sein sollten. Wird ein Auftrag an einem Arbeitssystem einen ganzen Tag bearbeitet, so können die Strompreisschwankungen dieses Tages nicht genutzt werden. Je kleiner die Bearbeitungszeiten sind, desto gezielter können Aufträge in Phasen niedriger bzw. hoher Strompreise bearbeitet werden.

Für die Berechnung der Prioritätswerte muss bestimmt werden, wann ein Auftrag an dem ersten Arbeitssystem bearbeitet werden kann. Die *Transportzeiten* und die *Bearbeitungs- sowie Rüstzeiten* aller Aufträge vor dem ersten Arbeitssystem müssen bekannt sein, um diesen geplanten Bearbeitungsbeginn zu berechnen. Weiterhin müssen die *Bearbeitungszeiten und die mittlere elektrische Leistung* für die Bearbeitung aller Aufträge in der Freigabe vorliegen.

Damit die Aufträge an der ersten Arbeitsstation in der Reihenfolge bearbeitet werden, in der sie freigegeben wurden, dürfen vor dem Arbeitssystem keine Reihenfolgevertauschungen vorgenommen werden. Dies wird durch das *reihenfolgeneutrale Sortierkriterium FIFO* umgesetzt.

4.2.2 Energiekostenorientierte Reihenfolgebildung

Reihenfolgeregel geringster Restschlupf

Die energiekostenorientierte Reihenfolgebildung (ECO-S⁵) orientiert sich an der weit verbreiteten Reihenfolgeregel geringster Restschlupf und wird nach jeder Fertigstellung eines Auftrages am Arbeitssystem m angewendet. In diesem Zusammenhang stellt $Schlupf_n$ [h] die verbleibende Zeit des betrachteten Auftrages ausgehend vom aktuellen Planungszeitpunkt TP_0 [h] bis zum geplanten Endtermin $TAE_{Plan,n}$ [h] dar, welcher nicht für die Durchführung $ZDF_{m,n}$ [h] (Bearbeitung und Rüsten) oder den Transport $ZUE_{min,m,n}$ [h], benötigt wird [Löd08]:

⁵ Energie Cost-Orientated-Sequencing

$$Schlupf_n = TAE_{Plan,n} - TP_0 - \sum_{m=AKtAS}^{AnzAS} ZDF_{m,n} - \sum_{m=AKtAS+1}^{AnzAS} ZUE_{min,m,n} \quad (5)$$

mit $n \in N$ Auftrag [-]

$m \in M$ Arbeitssystem [-]

$Schlupf_n$ Aktueller Schlupf bzw. Rest-Übergangszeiten von Auftrag n [h]

TP_0 Aktueller Planungszeitpunkt [h]

$TAE_{Plan,n}$ Plan-Bearbeitungsende des Auftrages n [h]

$ZDF_{m,n}$ Durchführungszeit von Auftrag n an Arbeitssystem m [h]

$ZUE_{min,m,n}$ Minimale Übergangszeit von Auftrag n zu Arbeitssystem m [h]

$AnzAS$ Gesamtanzahl der zu durchlaufenden Arbeitssysteme des Auftrages [-]

$AKtAS$ Index des aktuellen Arbeitssystems [-]

Bei dieser Regel erhält der Auftrag mit dem geringsten Schlupf, also der kürzesten Rest-Übergangs- bzw. Wartezeit, die höchste Priorität und wird somit als erstes bearbeitet [Löd08].

Energiekostenorientierte Reihenfolgebildung

Bei ECO-S wird von allen Aufträgen in der Warteschlange der Auftrag mit dem niedrigsten Prioritätswert $Pr_{n,m}$ als Erstes für das Arbeitssystem freigegeben.

Der Prioritätswert berechnet sich sehr ähnlich zu dem der EAnT (Abschnitt 4.2.1), jedoch ist neben der Berücksichtigung der Energiekosten noch eine Schlupf-Priorität integriert. Eine Gewichtung zwischen dem ersten Bestandteil der Gleichung (Energie-Priorität) und dem zweiten Teil der Gleichung (Schlupf-Priorität) erfolgt über den Faktor Sigma ς . Wird Sigma mit 0 gewählt, wird die Priorität nur über die Energiekosten bestimmt. Ist Sigma dagegen 1 ergibt sich die Reihenfolgeregel Geringster Restschlupf. Bei einem Sigma zwischen 0 und 1 erfolgt eine Priorisierung über Energiekosten und Schlupf. Mit steigendem Sigma werden dementsprechend die Termintreue und die Energiekosten ansteigen. Die Berechnung der Priorität erfolgt nach Gleichung (6):

$$Pr_{n,m} = \begin{cases} (1 - \varsigma) * \left(1 - \frac{\bar{P}_{n,m} * (\bar{k} - \bar{k}_{n,m})}{\bar{P}_{m,max} * (\bar{k} - k_{min})} \right) + \varsigma * \frac{Schlupf_n + Schlupf_{max,n,m}}{2 * Schlupf_{max,n,m}} & \text{für } \bar{k}_{n,m} < \bar{k} \\ (1 - \varsigma) * \left(\frac{\bar{P}_{n,m} * (\bar{k}_{n,m} - \bar{k})}{\bar{P}_{m,max} * (k_{max} - \bar{k})} \right) + \varsigma * \frac{Schlupf_n + Schlupf_{max,n,m}}{2 * Schlupf_{max,n,m}} & \text{für } \bar{k}_{n,m} \geq \bar{k} \end{cases} \quad (6)$$

mit $Pr_{n,m}$ Priorität des Auftrages n an Arbeitssystem m [-]

ς Sigma-Gewichtungsfaktor [-]

$\bar{P}_{n,m}$	durchschnittliche elektrische Leistungsaufnahme von Auftrag n an Arbeitssystem m [kW]
$\bar{P}_{m,max}$	Maximale durchschnittliche elektrische Leistungsaufnahme an Arbeitssystem m [kW]
\tilde{k}	Median des Strompreises im Betrachtungszeitraum [ct/kWh]
$Schlupf_{max,n,m}$	Maximal möglicher Schlupf von Auftrag n an Arbeitssystem m [h]
$\bar{k}_{n,m}$	Auftragsspezifischer Energiepreis -durchschnittlicher Strompreis für den Auftrag n an Arbeitssystem m [ct/kWh]
k_{max}	Maximaler Strompreis im Betrachtungszeitraum [ct/kWh]
k_{min}	Minimaler Strompreis im Betrachtungszeitraum [ct/kWh]

Bei der ECO-S müssen somit zunächst für jeden Auftrag n in der Warteschlange des Arbeitssystems i der $Schlupf_n$ nach Gleichung (5) sowie sein maximal möglicher Schlupf am Arbeitssystem m $Schlupf_{max,n,m}$ [h] aus den restlichen geplanten Übergangszeiten $ZUE_{Plan,n,m}$ des Auftrages n [h] berechnet werden:

$$Schlupf_{max,n,m} = \sum_{m=AktAS}^{AnzAS} ZUE_{Plan,n,m} \quad (7)$$

mit $Schlupf_{max,n,m}$ Maximal möglicher Schlupf von Auftrag n an Arbeitssystem m [h]

$ZUE_{Plan,n,m}$ Geplante Übergangszeit von Auftrag n zu Arbeitssystem m [h]

$\bar{k}_{n,m}$ ergibt sich wie in Gleichung (2) vom Fertigungssteuerungsverfahren EAnT. Lediglich der Starttermin berechnet sich anders, da der Auftrag nach seiner Rüstzeit direkt bearbeitet werden kann und zu diesem Zeitpunkt ein Energieverbrauch anfällt.

$$t_{start,n,m} = TP_0 + ZR_{n,m} \quad (8)$$

mit $t_{start,n,m}$ Beginn der Auftragsbearbeitung von Auftrag n an Arbeitssystem m [h]

$ZR_{n,m}$ Rüstzeit für Auftrag n an Arbeitssystem m [h]

Zur Gewährleistung der Termintreue ist im zweiten Teil von Gleichung (6) der Schlupf integriert. Weist ein Auftrag beispielsweise viel Schlupf auf, erhöht sich der Prioritätswert für den Auftrag und er wird weniger priorisiert. Sollte der Schlupf kleiner als $-Schlupf_{max,m}$ werden, würden sich negative Prioritätswerte ergeben, wodurch der negative Schlupf auf $-Schlupf_{max,m}$ begrenzt wird:

$$Schlupf_n = -(Schlupf_{max,m}) \text{ für } Schlupf_n \leq -Schlupf_{max,m} \quad (9)$$

Anwendungsvoraussetzungen

Die Anwendungsvoraussetzungen von ECO-S entsprechen nahezu denen der EAnT. Dafür müssen *Unterschiede in der elektrischen Leistung* der Aufträge am betrachteten Arbeitssystem sowie *Strompreisschwankungen* bestehen. Auch die *Bearbeitungszeiten der Aufträge pro Arbeitssystem sollten möglichst kurz* sein. Für die Berechnung der Prioritätswerte und des Schlupfes müssen die *Übergangszeiten* (Transport- und Wartezeiten) bekannt sein. Weiterhin müssen die *Bearbeitungszeiten und die mittlere elektrische Leistung* für die Bearbeitung für alle Aufträge vorliegen. Zudem erzeugt ein *Bestand vor dem Arbeitssystem* eine höhere Wirkungsweise, da mehr Aufträge für eine energiekostenorientierte Reihenfolgebildung zur Verfügung stehen. Der Prioritätswert muss zudem *nach jeder Fertigstellung eines Auftrages* erneut berechnet werden, damit der Prioritätswert der nachrückenden Aufträge auf Grundlage des aktuellen Strompreises bestimmt wird.

4.2.3 Energiekostenorientierte Rückstandsregelung

Rückstandsregelung

Das wichtigste Verfahren der Kapazitätssteuerung ist die Rückstandsregelung (RSR⁶). Dabei wird der Rückstand zu definierten Zeiten gemessen. Der Rückstand berechnet sich als die kumulierte Differenz des Ist-Abgangs zum Plan-Abgang. Er kann sich auf ein Arbeitssystem oder die gesamte Fertigung beziehen. Im folgenden Beispiel (Abbildung 11) bewegt sich der Rückstand mit einem leichten Aufwärtstrend und erreicht zum Zeitpunkt TP_0 den oberen Grenzurückstand. Nach einer gewissen Reaktionszeit Z_{RE} kann eine Maßnahme zur Kapazitätserhöhung (beispielsweise Überstunden oder Zusatzschichten) installiert werden, welche zum Zeitpunkt T_S über die Installationsdauer Z_{IN} wirkt. Während der Installationszeit kann der Rückstand abgebaut werden. Ohne eine Kapazitätsanpassung wäre der Rückstand möglicherweise weiter angestiegen. Hätte der Rückstand den unteren Grenzurückstand erreicht, wären Maßnahmen zur Kapazitätsreduktion (Minderstunden, Kurzarbeit) eingeführt worden. Bewegt sich der Rückstand zwischen den beiden Grenzen, werden keine Maßnahmen durchgeführt (Rückstandstoleranz). Die Auswahl der Maßnahmen erfolgt dabei anhand der Höhe des Grenzurückstandes. Genügen bei einem Grenzurückstand von vier Stunden zwei mal zwei Überstunden, um den Rückstand abzubauen, sollte bei einer höheren Grenze eine Zusatzschicht in Erwägung gezogen werden. Zudem werden die Maßnahmen über ihren Detaillierungsgrad, die maximale Durchführbarkeit, die Höhe der Kapazitätsanpassung und der Reaktionszeit charakterisiert [Löd08].

⁶ engl. Backlog Control (BC)

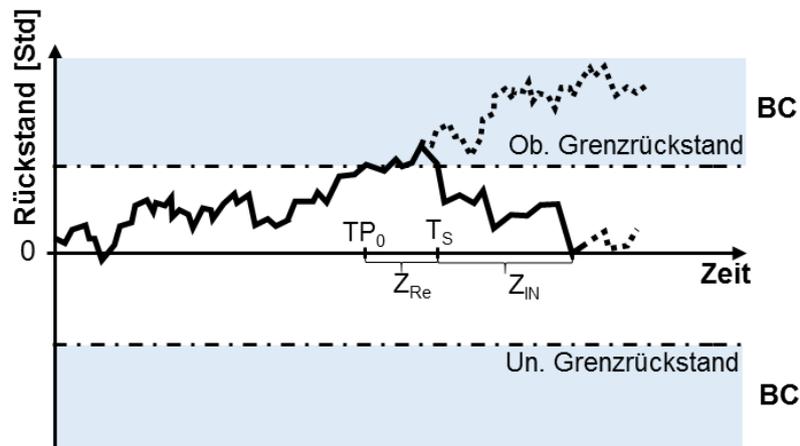


Abbildung 11: Exemplarische Darstellung der Rückstandsregelung [Löd08]

Energiekostenorientierte Rückstandsregelung

Die energiekostenorientierte Rückstandsregelung (ECO-BC⁷) erweitert die klassische Rückstandsregelung um einen zeitlichen Freiheitsgrad. Die gewählten Maßnahmen werden nun nicht direkt nach der Reaktionszeit (bei einer Überstunde die Zeit bis zum Schichtende), sondern möglicherweise erst später im Rahmen eines Entscheidungshorizontes in Abhängigkeit des Strompreises durchgeführt. Dafür wird der Grenzurückstand durch einen Auslöse- und einen Melderückstand ersetzt. Erreicht der Rückstand nun den oberen Melderückstand wird eine Maßnahmen zur Kapazitätserhöhung ausgewählt. Diese startet jetzt nicht nach der Reaktionszeit (am Schichtende) sondern nach einer gewissen Wartezeit Z_W . Im Folgenden gilt es, diese Wartezeit und damit den Startzeitpunkt der Maßnahme zur Kapazitätsanpassung zu bestimmen. Sollte durch die Maßnahme aufgrund des späten Startzeitpunktes der Rückstand nicht rechtzeitig abgebaut werden, wird nach einer gewissen Zeit der Auslöserückstand erreicht. Beim Auslöserückstand wird die ECO-BC außer Kraft gesetzt, die klassische Rückstandsregelung eingeführt und dadurch die Maßnahme direkt nach einer erneuten Reaktionszeit Z_{RE} durchgeführt (Abbildung 12).

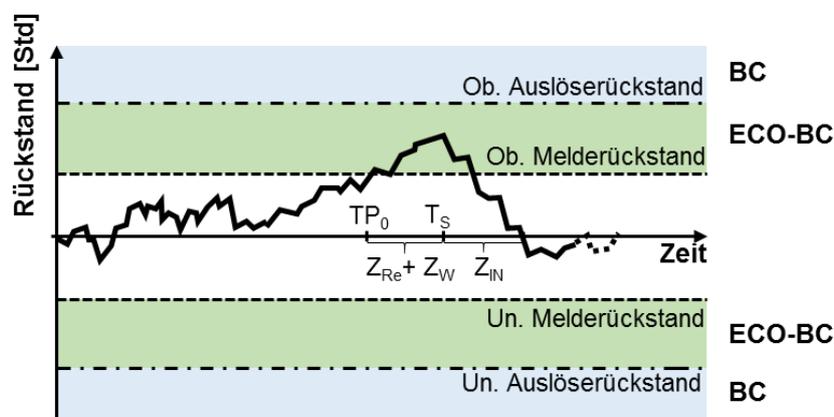


Abbildung 12: Exemplarische Darstellung der ECO-BC

⁷ Energy Cost-Oriented Backlog Control

Wird nun ein Rückstand gemessen, der zwischen dem Auslöse- und Melderückstand liegt, ist in Abhängigkeit des Melderückstandes eine Maßnahme (beispielsweise zwei Überstunden) auszuwählen. Gleichzeitig muss ein Entscheidungshorizont E festgelegt werden, innerhalb von wie vielen Tagen die Maßnahme durchgeführt werden muss. Zudem wird der durchschnittliche Energiepreis über die Installationszeit der Maßnahme zu allen möglichen Startzeitpunkten (Überstunden sind beispielsweise nur vor oder nach der Schicht möglich und auf 2 Überstunden pro Schicht begrenzt) innerhalb des Entscheidungshorizontes berechnet:

$$\bar{k}_{IN,T_{IN}} = \frac{\int_{T_{IN}}^{T_{IN}+Z_{IN}} K(t) dt}{Z_{IN}} \quad (10)$$

- mit $\bar{k}_{IN,T_{IN}}$ Maßnahmenspezifischer Energiepreis – durchschnittlicher Strompreis für ausgewählte Maßnahme [ct/kWh]
 $K(t)$ Strompreis zum Zeitpunkt t [ct/kWh]
 T_{IN} Installationsbeginn der Maßnahme [h]
 Z_{IN} Installationszeit der Maßnahme [h]

Der durchschnittliche Energiepreis für eine Maßnahme zu einem Startzeitpunkt wird dabei über einen Verzinsungsfaktor VF_0 über den Entscheidungshorizont E linear abgewertet (bei einer Kapazitätserhöhung) bzw. aufgewertet (bei einer Kapazitätsreduzierung). Der Verzinsungsfaktor ist die individuelle Präferenz eines Unternehmens zu einem früheren Startzeitpunkt für die Durchführung der Maßnahme. Ein hoher Faktor bedeutet, dass eine frühe Durchführung der Maßnahme bevorzugt wird, was vor allem auf einer hohen Termintreue abzielt. Bei einem niedrigen Verzinsungsfaktor werden frühe Startzeitpunkte zur Durchführung der Maßnahme weniger priorisiert. Dadurch erhöht sich der Handlungsspielraum im Rahmen des Entscheidungshorizontes, die Maßnahme zu niedrigen Energiepreisen (bei einer Kapazitätserhöhung) bzw. hohen Energiepreisen (bei einer Kapazitätsreduktion) durchzuführen.

Dafür wird der erste Tag des Entscheidungshorizontes vollständig verzinst, der letzte Tag des Entscheidungshorizontes gar nicht verzinst. Daraus ergeben sich durch die Linearität die Verzinsungsfaktoren VZ_d allgemein zu:

$$VZ_d = VF_0 + \frac{VF_0}{E-1}(1-d) \quad (11)$$

- mit VZ_d Verzinsungsfaktor für den Tag d [%]
 $d \in D$ Tag im Entscheidungshorizont [BKT]
 VZ_0 Verzinsungsfaktor [%]
 E Entscheidungshorizont [BKT]

Da eine Kapazitätserhöhung zu Zeiten niedriger Energiepreise und eine Kapazitätsreduktion zu Zeiten hoher Energiepreise stattfinden soll, werden die durchschnittlichen maßnahmenspezifischen Energiepreise bei einer Kapazitätserhöhung aufgezinnt und bei einer Kapazitätsreduktion abgezinst. Dementsprechend wird bei einer Kapazitätserhöhung der Startzeitpunkt mit dem niedrigsten abgezinsten Energiepreis ausgewählt. Bei einer Kapazitätsreduktion wird der Startzeitpunkt mit dem höchsten aufgezinnten Energiepreis ausgewählt:

$$\bar{k}'_{IN,T_{IN}} = \bar{k}_{IN,T_{IN}} * (1 - VZ_{d(T_{IN})}) \quad \text{bei einer Kapazitätserhöhung} \quad (12)$$

$$\bar{k}'_{IN,T_{IN}} = \bar{k}_{IN,T_{IN}} * (1 + VZ_{d(T_{IN})}) \quad \text{bei einer Kapazitätsreduktion} \quad (13)$$

mit $\bar{k}'_{IN,T_{IN}}$ Verzinsten maßnahmenspezifischer Energiepreis [ct/kWh]

Geht man nun bei einer zu planenden Kapazitätserhöhung von einem konstanten Energiepreis aus (Abbildung 13a), wird der erste von drei Tagen des Entscheidungshorizontes am stärksten abgezinst, der letzte Tag (Tag 3) gar nicht abgezinst und somit der erste Tag als Startzeitpunkt ausgewählt, da dort der niedrigste abgezinsten Strompreis vorliegt. Liegt jedoch ein schwankender Strompreis (Abbildung 13b) vor, wird ebenso der erste von drei Tagen des Entscheidungshorizontes am stärksten abgezinst, der letzte Tag (Tag 3) gar nicht abgezinst. Jedoch liegt der geringste abgezinsten Energiepreis an Tag 2 vor, wodurch der Startzeitpunkt der Maßnahme an diesem Tag vorhergesehen wird.

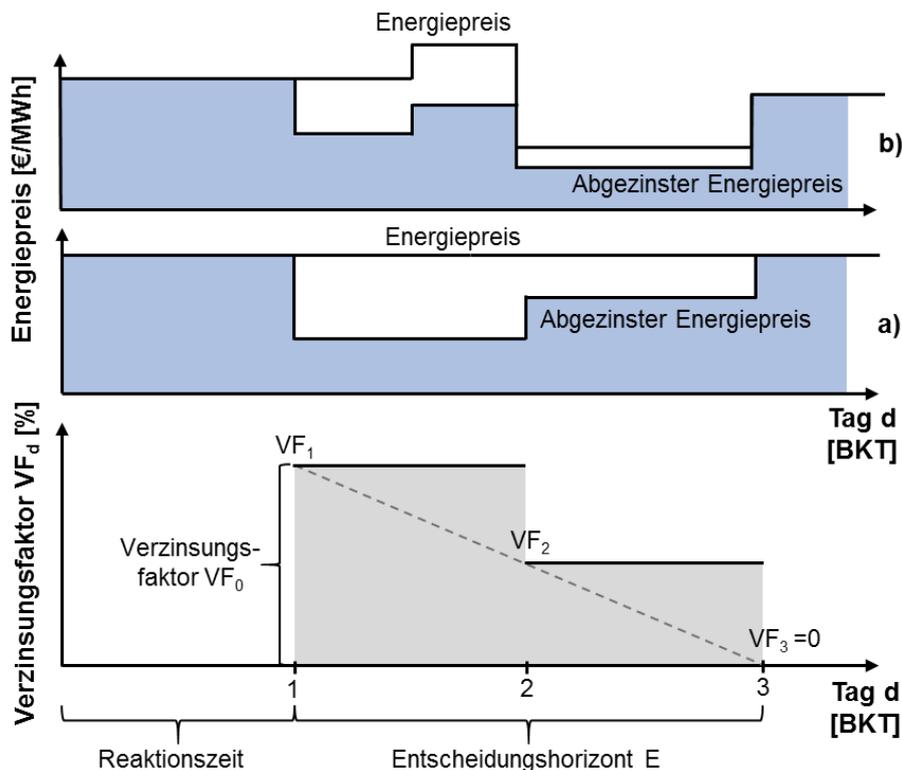


Abbildung 13: Wirkungsweise des Verzinsungsfaktors bei einer Kapazitätserhöhung

Anwendungsvoraussetzungen

Um Energiekosten einzusparen, sind wie auch bei den anderen weiterentwickelten Verfahren *volatile Energiepreise mit Prognosen* für den in die Zukunft gerichteten Entscheidungshorizont notwendig. Zudem muss wie bei jedem Verfahren zur Kapazitätssteuerung eine gewisse *Kapazitätsflexibilität* gegeben sein, um Maßnahmen zur Kapazitätsveränderung überhaupt durchführen zu können. Zudem müssen von den anwendenden Unternehmen der *Entscheidungshorizont* und der *Verzinsungsfaktor* festgelegt werden. Ein *langer Entscheidungshorizont und ein kleiner Verzinsungsfaktor* eröffnen für das Verfahren das höchste Potential zur Energiekosteneinsparung, wodurch jedoch die Einhaltung der Termintreue gefährdet wird.

4.3 Validierung

Nachdem in 4.2 die weiterentwickelten Fertigungssteuerungsverfahren vorgestellt und ihre Anwendungsvoraussetzungen erläutert wurden, erfolgte in Abschnitt 4.3 die Validierung der Verfahren in Bezug auf das Kostensenkungspotential. Zunächst wird das zugrunde liegende Simulationsmodell vorgestellt und im Folgenden die Energiekosteneinsparungen sowie die Auswirkungen auf die logistischen Zielgrößen dargestellt.

4.3.1 Aufbau und Verifikation des Simulationsmodells

Zur Validierung der entwickelten Fertigungssteuerungsverfahren wurde mittels der Software Tecnomatix Plant Simulation ein Simulationsmodell aufgebaut, welches eine KMU-spezifische Fertigungsumgebung vereinfacht darstellt. Darin wurden die weiterentwickelten Verfahren sowie die ursprünglichen Referenzverfahren implementiert.

Im Simulationsmodell besteht die Fertigung aus vier Arbeitssystemen, auf denen sechs Produktvarianten basierend auf einer empirischen Verteilung gefertigt werden (Abbildung 14). Die Varianten unterscheiden sich dabei in ihren losweisen Materialflüssen, mittleren elektrischen Leistungen während der Bearbeitungen und Einzelbearbeitungszeiten. Rüst- und Transporten wurden zusätzlich integriert, welche sich zwischen den Produktvarianten jedoch nicht unterscheiden.

Die Losgrößen werden im Rahmen der Auftragserzeugung mittels einer linkssteilen Erlang-Verteilung (Mittelwert: 13, Standardabweichung: 10) bestimmt, wogegen der Variantenmix einem vorgegebenen Muster folgt. Die Erzeugungszeitpunkte der Aufträge sind dagegen belastungsorientiert. Die Zeit bis zur Erzeugung des folgenden Auftrages entspricht der Bearbeitungszeit des zuvor erzeugten Auftrages, wobei diese Zeit durch eine Normalverteilung einer kleinen Streuung unterworfen wird, um kein ideales Erzeugungsverhalten zu bewirken.

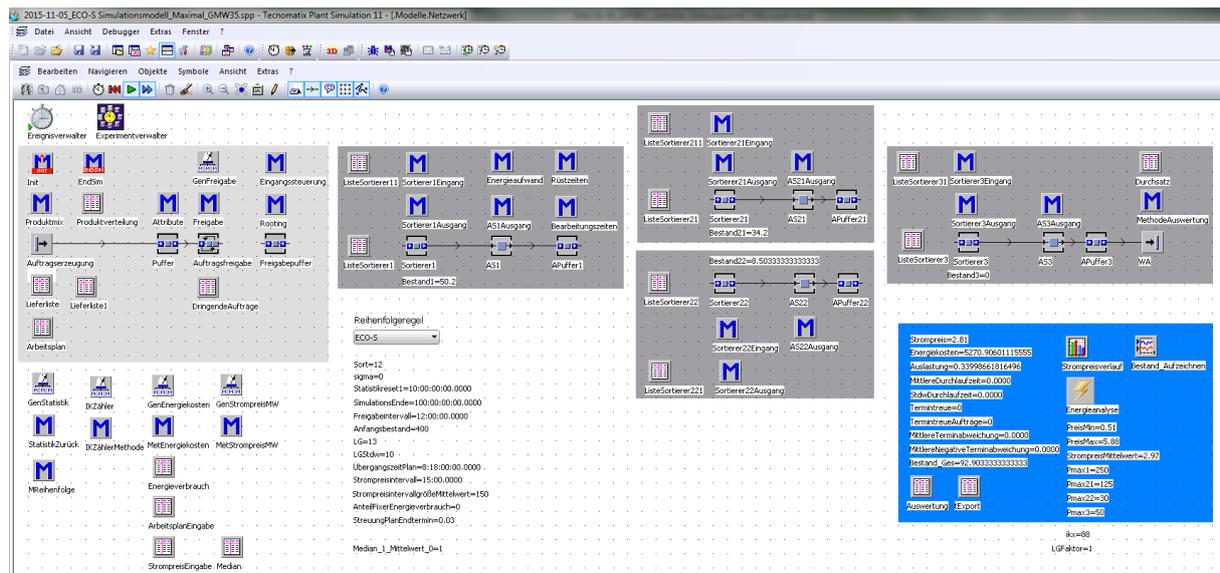


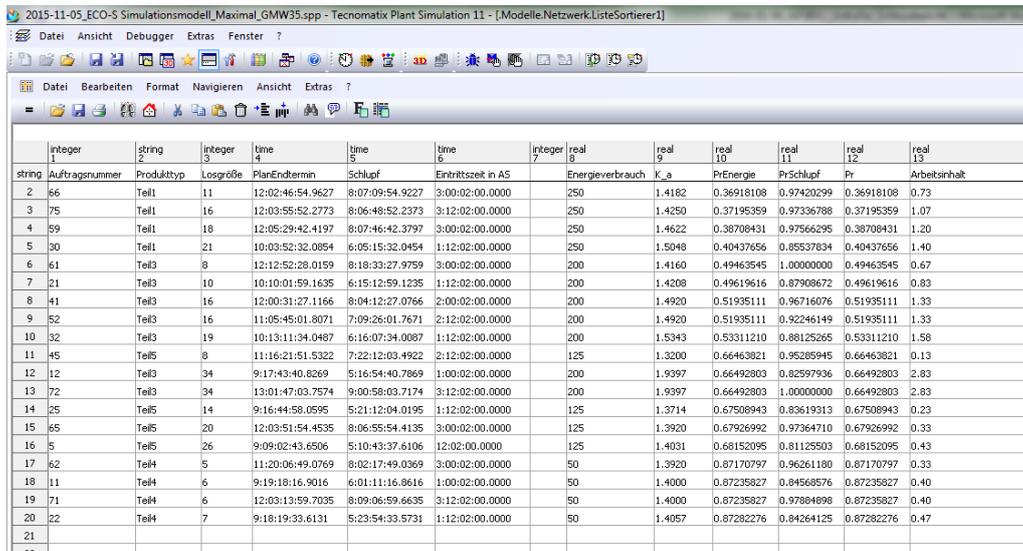
Abbildung 14: Aufbau des Simulationsmodells in Plant Simulation

Die Auftragsfreigabe gibt alle 12 Stunden Aufträge nach ihrem Plan-Starttermin sortiert in die Fertigung frei. Der Plan-Starttermin ergibt sich aus dem Zeitpunkt der Auftragszeugung erweitert um 6 Stunden. Der Plan-Endtermin wird über eine Vorwärtsterminierung vom Zeitpunkt der Auftragsfreigabe anhand der Durchführungszeiten, Plan-Übergangszeiten und der Transportzeit ermittelt, wobei auch der Plan-Endtermin durch eine Normalverteilung einer gewissen Streuung unterliegt. Zudem wurde ein hohes Bestandsniveau erzeugt, welches in einer Auslastung von 100% resultiert. Ebenso wurde der reale Strompreis der Strombörse EEX von Januar bis November 2015 integriert und darauf aufbauend alle 15 Minuten die resultierenden Energiekosten berechnet.

Nach einer Einschwingphase von 10 Tagen wurden alle Aufträge (hinsichtlich ihrer Durchlaufzeit, Standardabweichung der Durchlaufzeit, Termintreue, mittleren Terminabweichung, mittleren positiven Terminabweichung), welche in den darauf folgenden 90 Tagen fertig gestellt werden, ausgewertet. Zudem wurden über die 90 Tage die Auslastung, die Energiekosten und die Ausbringungsmenge gemessen. Um Zufallseinflüsse zu verhindern wurden für jedes Experiment 10 Beobachtungen mit anderen Startwerten der zugrunde gelegten Zufallsverteilungen durchgeführt.

Zur finalen systematisierten sowie effizienten Durchführung der Verifikation des Modells wurden Animation zur schnellen Aufdeckung offensichtlicher Logikfehler, Aufzeichnung und Auswertung von Statistiken, Plausibilitätsprüfungen dieser sowie eine Sensitivitätsanalyse angewandt. Dafür wurden vor allem die Inhaltslisten der Sortierer, in denen alle Aufträge der Warteschlange eines Arbeitssystems in der geplanten Bearbeitungsreihenfolge enthalten sind. Die Liste beinhaltet zudem alle Auftragseigenschaften, die für die Prüfung der korrekten Umsetzung notwendig sind (Abbildung 15). Durch die Beobachtung der visualisierten Aufträge kann beispiels-

weise überprüft werden, ob die Aufträge zur richtigen Zeit und in der richtigen Reihenfolge aus dem Sortierer zur Einzelstation weitergeleitet werden.



integer	string	integer	time	time	time	integer	real	real	real	real	real	real
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
string	Auftragsnummer	Produkttyp	Losgröße	PlanEndtermin	Schlupf	Eintrittszeit in A5	Energieverbrauch	K_a	PrEnergie	PrSchlupf	Pr	Arbeitsinhalt
2	66	Teil1	11	12:02:46:54.9627	8:07:09:54.9227	3:00:02:00.0000	250	1.4182	0.36918108	0.97420299	0.36918108	0.73
3	75	Teil1	16	12:03:55:52.2773	8:06:48:52.2373	3:12:02:00.0000	250	1.4250	0.37195359	0.97336788	0.37195359	1.07
4	59	Teil1	18	12:05:29:42.4197	8:07:46:42.3797	3:00:02:00.0000	250	1.4622	0.38708431	0.97566295	0.38708431	1.20
5	30	Teil1	21	10:03:52:32.0854	6:05:15:32.0454	1:12:02:00.0000	250	1.5048	0.40437656	0.85537834	0.40437656	1.40
6	61	Teil3	8	12:12:52:28.0159	8:18:33:27.9759	3:00:02:00.0000	200	1.4160	0.49463545	1.00000000	0.49463545	0.67
7	21	Teil3	10	10:10:01:59.1635	6:15:12:59.1235	1:12:02:00.0000	200	1.4208	0.49619616	0.87908672	0.49619616	0.83
8	41	Teil3	16	12:00:31:27.1166	8:04:12:27.0766	2:00:02:00.0000	200	1.4920	0.51935111	0.96716076	0.51935111	1.33
9	52	Teil3	16	11:05:45:01.8071	7:09:26:01.7671	2:12:02:00.0000	200	1.4920	0.51935111	0.92246149	0.51935111	1.33
10	32	Teil3	19	10:13:11:34.0487	6:16:07:34.0087	1:12:02:00.0000	200	1.5343	0.53311210	0.88125265	0.53311210	1.58
11	45	Teil5	8	11:16:21:51.5322	7:22:12:03.4922	2:12:02:00.0000	125	1.3200	0.66463821	0.95285945	0.66463821	0.13
12	12	Teil3	34	9:17:43:40.8269	5:16:54:40.7869	1:00:02:00.0000	200	1.9397	0.66492803	0.82597936	0.66492803	2.83
13	72	Teil3	34	13:01:47:03.7574	9:00:58:03.7174	3:12:02:00.0000	200	1.9397	0.66492803	1.00000000	0.66492803	2.83
14	25	Teil5	14	9:16:44:58.0595	5:21:12:04.0195	1:12:02:00.0000	125	1.3714	0.67508943	0.83619313	0.67508943	0.23
15	65	Teil5	20	12:03:51:54.4535	8:06:55:54.4135	3:00:02:00.0000	125	1.3920	0.67926992	0.97364710	0.67926992	0.33
16	5	Teil5	26	9:09:02:43.6506	5:10:43:37.6106	12:02:00.0000	125	1.4031	0.68152095	0.81125503	0.68152095	0.43
17	62	TeilH	5	11:20:06:49.0769	8:02:17:49.0369	3:00:02:00.0000	50	1.3920	0.87170797	0.96261180	0.87170797	0.33
18	11	TeilH	6	9:19:18:16.9016	6:01:11:16.8616	1:00:02:00.0000	50	1.4000	0.87235827	0.84568576	0.87235827	0.40
19	71	TeilH	6	12:03:13:59.7035	8:09:06:59.6635	3:12:02:00.0000	50	1.4000	0.87235827	0.97884698	0.87235827	0.40
20	22	TeilH	7	9:18:19:33.6131	5:23:54:33.5731	1:12:02:00.0000	50	1.4057	0.87282276	0.84264125	0.87282276	0.47
21												
21												

Abbildung 15: Beispiel für den Aufbau einer Sortierer-Liste mit den Informationen der in der Warteschlange wartenden Aufträge

4.3.2 Ergebnisse der Validierung der energiekostenorientierten Auftragsfreigabe nach Termin

Zunächst wurden nach der Integration der Auftragsfreigabe nach Termin sowie der energiekostenorientierten Auftragsfreigabe nach Termin in das Simulationsmodell für eine Parameterkonfiguration die erweiterten logistischen Zielgrößen aufgenommen. Es konnte festgestellt werden, dass sowohl die absoluten Energiekosten als auch die Energiekosten pro Stück Ausbringungsmenge um vier Prozent reduziert werden konnten (Abbildung 16). Die Auslastung und die Ausbringungsmenge sind nahezu konstant geblieben. Gegenüber Auftragsfreigabe nach Termin (AnT) ist bei der Energiekostenorientierten Auftragsfreigabe nach Termin (EAnT) die Termintreue ein wenig und die Standardabweichung der Durchlaufzeit deutlich geringer (kombiniert mit der Reihenfolgeregel FIFO). Auch die mittlere positive Terminabweichung (die Zeit, welche verspätete Aufträge zu spät kommen) ist gesunken. Die mittlere Terminabweichung (im Mittel kommen alle Aufträge zu früh, die mittlere Terminabweichung ist somit negativ) stieg zudem an. An dieser Stelle sei jedoch darauf hingewiesen, dass die Werte der logistischen Zielgrößen stark von den gewählten Parametern im Simulationsszenario abhängen. Eine systematische Beeinflussung der Energiekosten konnte jedoch nachgewiesen werden

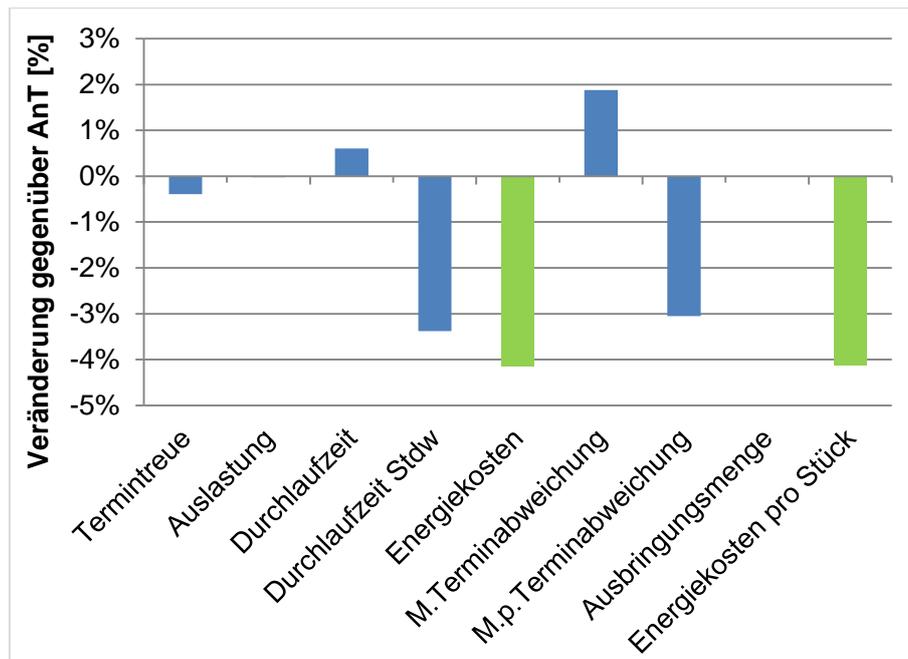


Abbildung 16: Auswirkungen der EAnT auf die erweiterten logistischen Zielgrößen

Im Folgenden wurden die Leistungsschwankungen, der Anteil des fixen Energieverbrauches, das Freigabeintervall, der rollierende Strompreismedian, die mittlere Losgröße, das Bestandsniveau sowie die Strompreisschwankungen variiert und die Auswirkungen auf die Energiekosteneinsparungen gegenüber der Auftragsfreigabe nach Termin untersucht.

Leistungsschwankungen

Zunächst wurden die produkt- und arbeitssystemspezifischen mittleren elektrischen Leistungen verändert. Dafür wurde durch eine Abzinsung der auftragspezifischen elektrischen Leistung um den über die Auftretenswahrscheinlichkeit der Produktvarianten gewichteten Mittelwert eine Reduktion der Streuung erreicht. In Abbildung 17 sind im linken Teil die Leistungsschwankungen im Ausgangszustand (Abzinsung 0%) und im rechten Teil bei einer Abzinsung von 50% dargestellt.

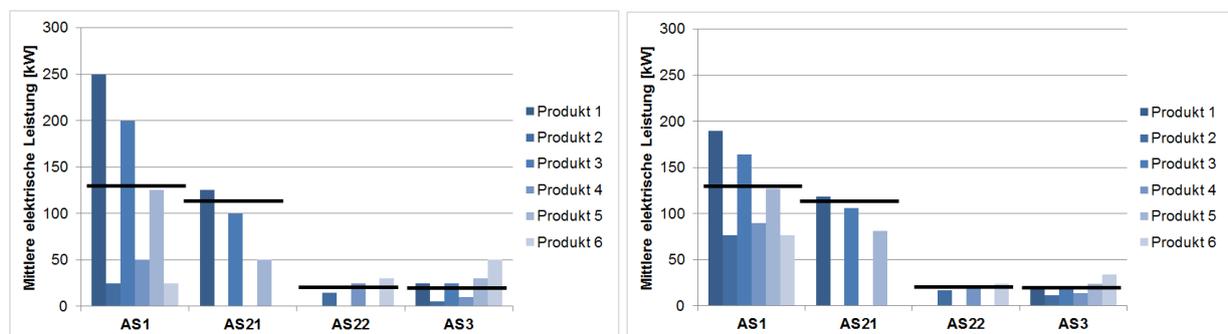


Abbildung 17: Abzinsung der elektrischen Leistungsschwankung

Im Rahmen der Simulation konnte festgestellt werden, dass bei der höchsten Streuung der Leistungsschwankung (Abzinsung 0%) die höchsten Energiekosteneinsparungen von EAnT gegenüber AnT erreicht werden können (Abbildung 18). Bei einer

vollständigen Abzinsung (100%) unterscheiden sich die mittleren elektrischen Leistungen an einem Arbeitssystem je Produkt nicht mehr und entsprechen dem gewichteten Mittelwert (schwarze Linie in Abbildung 17). Es ist keine Energiekosteneinsparung mehr möglich. Dazwischen nehmen die Energiekosteneinsparungen linear ab.

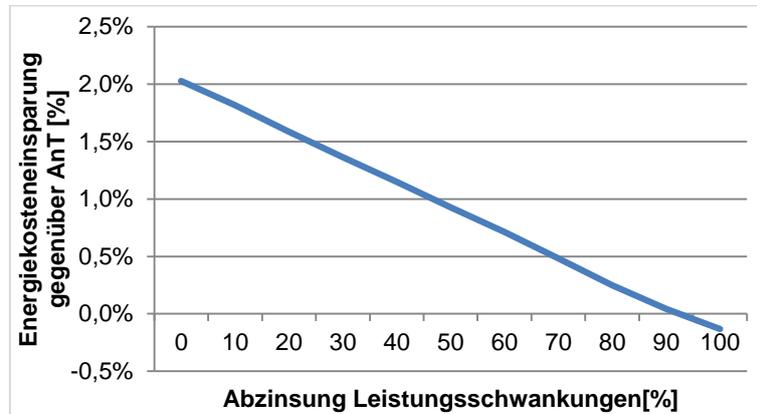


Abbildung 18: Energiekosteneinsparung durch EAnT bei Veränderung der Leistungsschwankung

Fixer Energieverbrauch

Im Folgenden wurde der Anteil des fixen Energieverbrauches gegenüber dem variablen Anteil erhöht, wodurch sich der variable Anteil des Gesamtenergieverbrauches immer weiter reduziert. Existiert nur ein variabler Anteil, ist der Gesamtverbrauch der Anlage während der Bearbeitung vollständig beeinflussbar, wodurch sich die höchsten Energiekosteneinsparungen ergeben (ca. 3,7%). Liegt der Anteil des fixen Energieverbrauches bei 100% (variabler Anteil entspricht dem fixen Anteil) kann nur noch ca. 1% der Energiekosten eingespart werden. Würde der Anteil des fixen Energieverbrauches weiter erhöht werden, geht der Anteil des variablen Energieverbrauches gegen 0, wodurch keine Energiekosteneinsparungen mehr möglich wären, da ein regressiver Kurvenverlauf vorliegt.

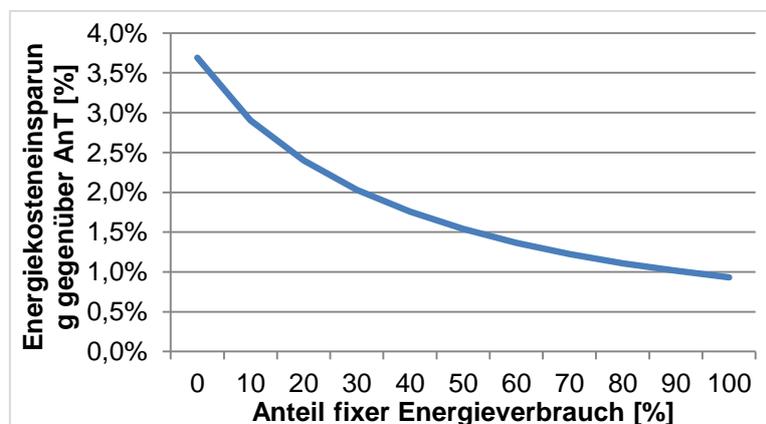


Abbildung 19: Energiekosteneinsparung durch EAnT bei steigendem Anteil des fixen Energieverbrauches

Freigabeintervall

Das Freigabeintervall, also die Zeit zwischen zwei Auftragsfreigaben, bestimmt den Bestand an Aufträgen vor dem Zugang zur Fertigung, aus dem freizugebende Aufträge ausgewählt werden können. In der Simulationsstudie konnte herausgestellt werden, dass mit steigendem Freigabeintervall bei konstanter Auftragserzeugung und damit zwangsläufig höheren Beständen die Energiekosteneinsparungen degressiv zunehmen.

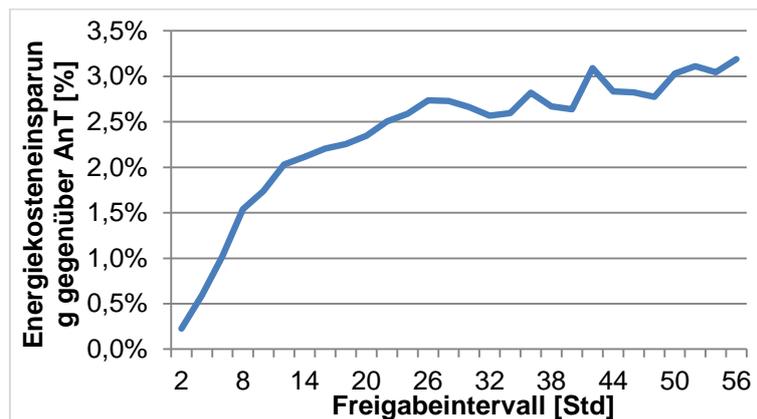


Abbildung 20: Energiekosteneinsparung durch EAnT bei Veränderung des Freigabeintervalls der Auftragsfreigabe

Es stehen der Auftragsfreigabe somit immer mehr Aufträge zur Verfügung, aus denen der energiekostenoptimalste Auftrag ausgewählt werden kann. Zudem scheint eine maximale Einsparung mit einer Zunahme des Bestandsniveaus in der Auftragsfreigabe nicht überschritten zu werden. Bei einem sehr kurzen Freigabeintervall stehen dagegen möglicherweise nur 1 oder 2 Aufträge zur Freigabe zur Verfügung, wodurch sich das Einsparpotential für die Energiekosten stark reduziert.

Rollierender Strompreismedian

Eine Erhöhung des rollierenden Strompreismedians entspricht einer Verlängerung des Berechnungszeitraumes für den Median des zukünftigen Strompreises. Diesem ist vorausgesetzt, dass die zukünftigen Strompreise für eben diesen Betrachtungszeitraum bekannt sind. Es ist zu erkennen, dass ein kurzes Berechnungsintervall wenig Energiekosteneinsparungen ermöglicht, weil der zugrunde gelegte Zeitraum nicht repräsentativ und ggf. kürzer als die Bearbeitungszeit mancher Aufträge ist. Gleichzeitig erzeugt ein zu großes Berechnungsintervall nicht die höchsten Energiekosteneinsparungen, da Hoch- oder Niederpreisphasen nicht mit berücksichtigt werden. Die höchste Energiekosteneinsparung ist bei einem Berechnungsintervall von 13 Stunden erreicht.

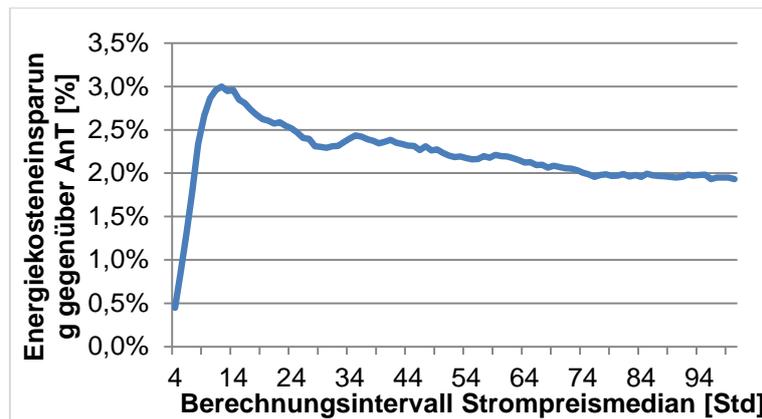


Abbildung 21: Energiekosteneinsparung durch EAnT bei Veränderung des Berechnungsintervalls des rollierenden Strompreismedians

Mittlere Losgröße

Zur Untersuchung der Auswirkungen der mittleren Bearbeitungszeit der Aufträge auf die Energiekosteneinsparung wurde die mittlere Losgröße der Aufträge erhöht. Gleichzeitig wurde die Standardabweichung der Losgröße, welche den Verlauf der linkssteilen Erlang-Verteilung bestimmt, so erhöht, dass der Variationskoeffizient der Verteilung konstant blieb. In Abbildung 22 ist zu erkennen, dass durch kurze mittlere Bearbeitungszeiten die höchsten Energiekosteneinsparungen erreicht werden, da kurze Aufträge besser die stark schwankenden Strompreise ausnutzen können.

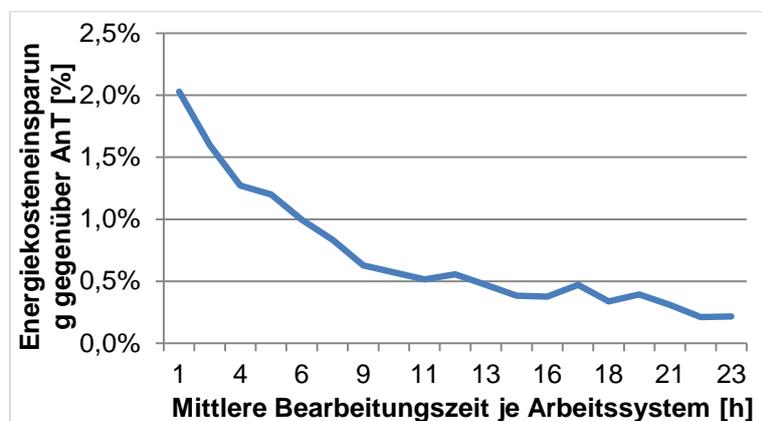


Abbildung 22: Energiekosteneinsparung durch EAnT bei Veränderung der mittleren Losgröße

Weist ein Auftrag jedoch eine mittlere Bearbeitungszeit von fast 24 Stunden auf, sind durch den regressiven Kurvenverlauf nahezu keine Einsparungen an Energiekosten möglich. Ein Verschieben dieser Aufträge nutzt die täglichen systematischen Strompreisschwankungen nicht zielgerichtet aus.

Bestandsniveau

Ein abweichendes Bestandsniveau wurde durch eine Veränderung der Losgröße der zu Beginn der Simulation in die Fertigung freigegebenen Dummy-Aufträge erzeugt. Durch die hohe Losgröße werden die Arbeitssysteme zunächst blockiert und erzeu-

gen somit einen Bestand. Es ist Abbildung 23 zu entnehmen, dass die Energiekosteneinsparung durch die Auftragsfreigabe vom mittleren Bestandniveau an jedem Arbeitssystem nahezu unabhängig ist. In der Realität würde die Energiekosteneinsparung jedoch mit steigendem Bestand abnehmen, da die Wahrscheinlichkeit der Bearbeitung zum prognostizierten Zeitpunkt durch Störungen mit steigendem Bestand abnimmt. Störungen in der Bearbeitung wurden im Simulationsmodell jedoch nicht berücksichtigt.

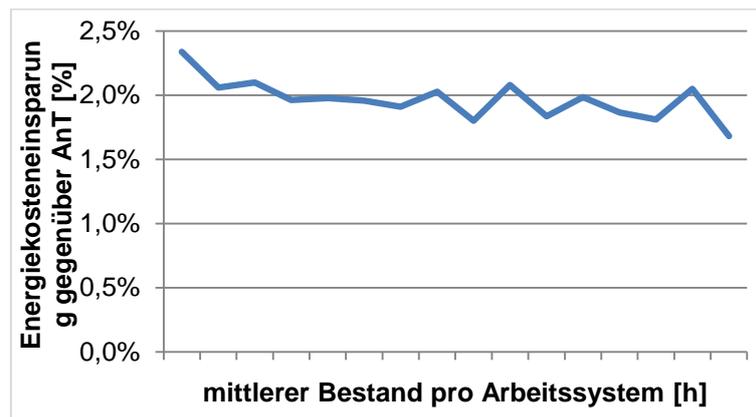


Abbildung 23: Energiekosteneinsparung durch EAiT bei Veränderung des Bestandsniveaus der Fertigung

Strompreisschwankungen

In das Simulationsmodell wurden die realen Strompreise der EEX vom 1. Januar 2015 bis zum 5. November 2015 integriert. Um geringere Strompreisschwankungen simulieren zu können, wurden die realen Preise ähnlich wie bei den Leistungsschwankungen gegenüber dem Strompreismedian der 10 Monate (3,09 cent/kWh) linear abgezinst. So erzeugt ein Abzinsungsfaktor von 0% den realen Strompreis. Ein Abzinsungsfaktor von 100% hat dagegen einen konstanten Strompreis von 3,09 cent/kWh zur Folge (Abbildung 24).

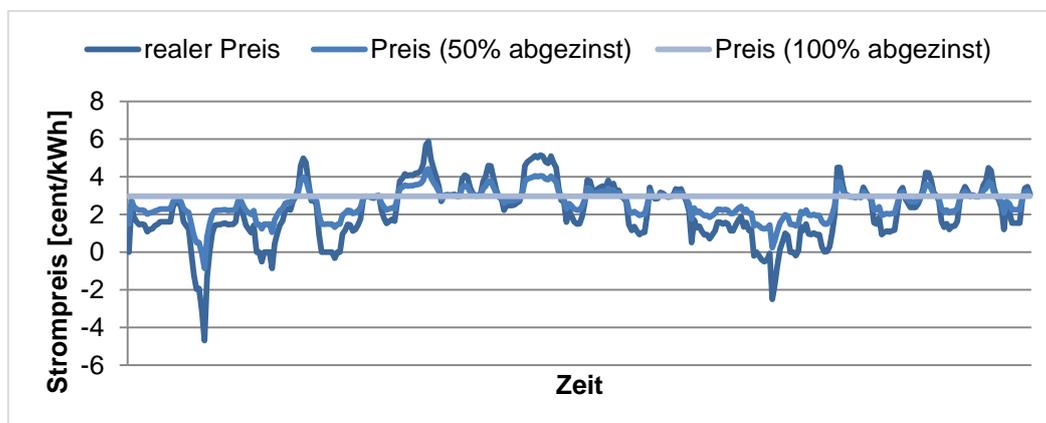


Abbildung 24: Wirkungsweise der Abzinsung des realen Spot-Strompreises

Beim Vorliegen eines realen Strompreises sind nach Abbildung 25 die höchsten Energiekosteneinsparungen möglich. Mit steigendem Abzinsungsfaktor und damit

sinkenden Strompreisschwankungen nehmen die Einsparungen ab. Bei einem konstanten Strompreis sind keine Energiekosteneinsparungen zu erreichen.

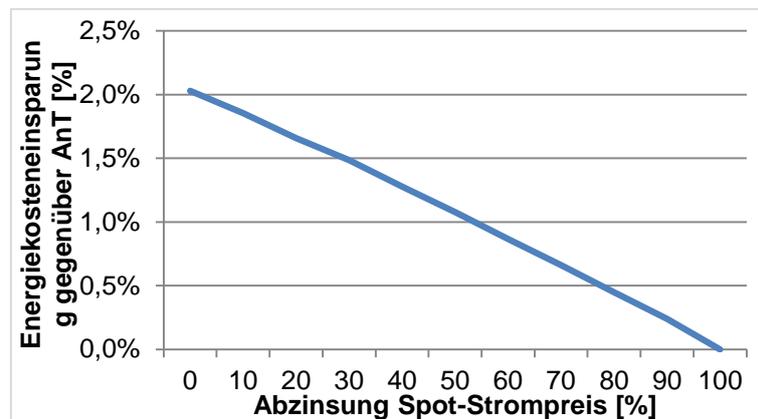


Abbildung 25: Energiekosteneinsparung durch EAnT bei Veränderung der Strompreisschwankungen

4.3.3 Ergebnisse der Validierung der energiekostenorientierten Reihenfolgebildung

Zur Validierung von ECO-S wurde das weiterentwickelte Verfahren sowie FIFO in das Simulationsmodell implementiert. Eine Freigabe der Aufträge erfolgt dabei über die klassische Auftragsfreigabe nach Termin mit einem Freigabeintervall von 12 Stunden. Zunächst wurden für eine im Sinne der Energiekosteneinsparung geeignete Parameterkonfiguration die Auswirkung des Gewichtungsfaktors Sigma auf die logistischen Zielgrößen sowie die Energiekosten untersucht.

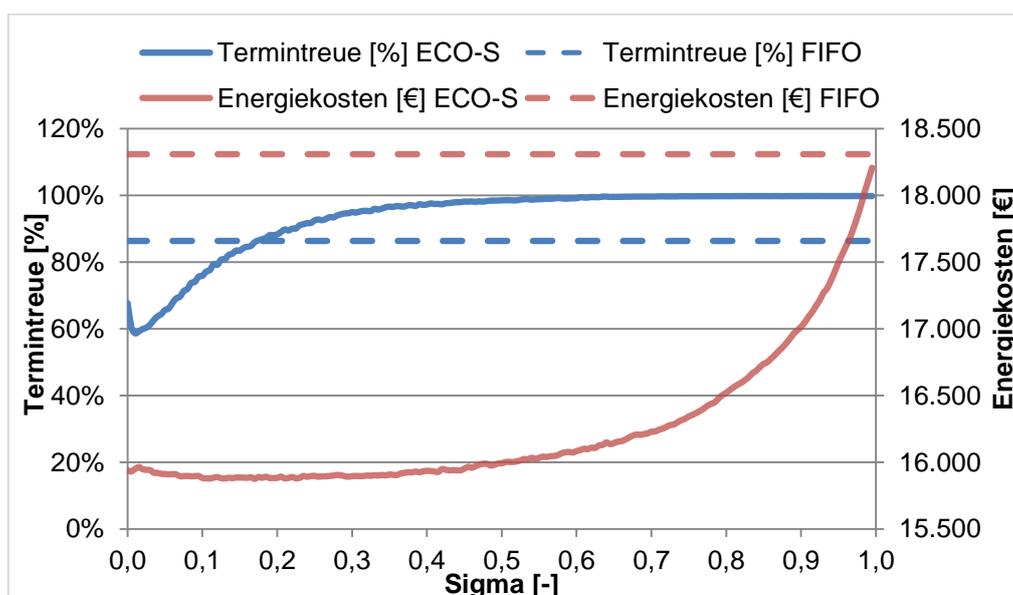


Abbildung 26: Auswirkungen von Sigma auf die Termintreue und die Energiekosten

Dabei ist zu erkennen, dass mit einem steigenden Sigma, also einer zunehmenden Berücksichtigung des Schlupfes, die Energiekosten progressiv ansteigen (Abbildung

26). Gleichzeitig nimmt die Termintreue degressiv zu und nähert sich in diesem Fall 100% an. Bei einem Sigma von 0, also einer reinen Berücksichtigung der Energiekosten, werden nicht unbedingt die geringsten Energiekosten erzielt (Energiekosteneinsparungen gegenüber FIFO von 14,87%). Die geringsten Energiekosten liegen bei einem Sigma von 0,2 vor. Hier werden Energiekosteneinsparungen gegenüber FIFO von 15,33% erreicht. Dies könnte daran liegen, dass die reinen Berücksichtigung der Energiekosten einer Störgröße gleich und erst mit einer zunehmenden Berücksichtigung des Schlupfes die volle Wirkung entfaltet. Ein zunächst kurzzeitiger Abfall der Termintreue ausgehend von einem Sigma 0 ist nicht zu erklären. Der degressive bzw. progressive Kurvenlauf ist einer unterschiedlichen Standardabweichung der Prioritätsbestandteile geschuldet.

Bei einem Sigma von 0 liegen sehr hohe mittlere Standardabweichungen der Durchlaufzeit vor, welche sich jedoch mit zunehmendem Sigma einem moderaten Wert regressiv annähern (Abbildung 27). Ebenso verhält sich die mittlere Durchlaufzeit der ausgewerteten Aufträge.

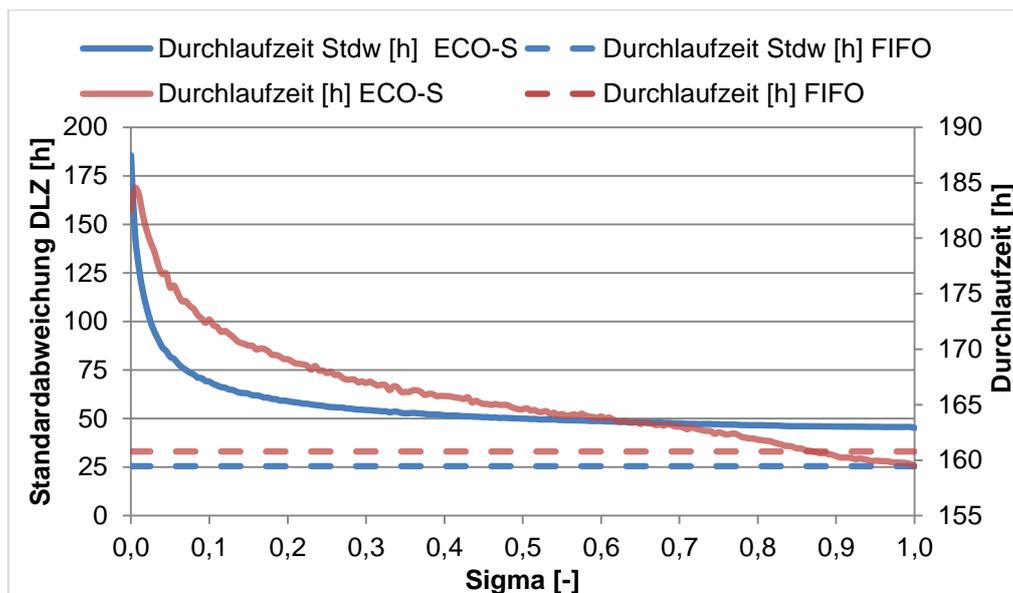


Abbildung 27: Auswirkungen von Sigma auf die Durchlaufzeit und ihre Standardabweichung

Ähnliche Verläufe weisen die mittlere Terminabweichung und die mittlere positive Terminabweichung auf (Abbildung 28). Bei einem Sigma von 0 kommen alle verspäteten Aufträge im Mittel 180 Stunden zu spät. Durchschnittlich kommen jedoch alle Aufträge 25 Stunden zu früh. Mit zunehmendem Sigma nimmt die mittlere positive Terminabweichungen ab (verspätete Aufträge kommen weniger zu spät) und die mittlere Terminabweichung zu (im Mittel werden alle Aufträge noch früher fertig). Bei einem Sigma von 1 kommen verspätete Aufträge nur noch ca. 15 Stunden zu spät. Durchschnittlich werden alle Aufträge dagegen 50 Stunden zu früh fertig gestellt.

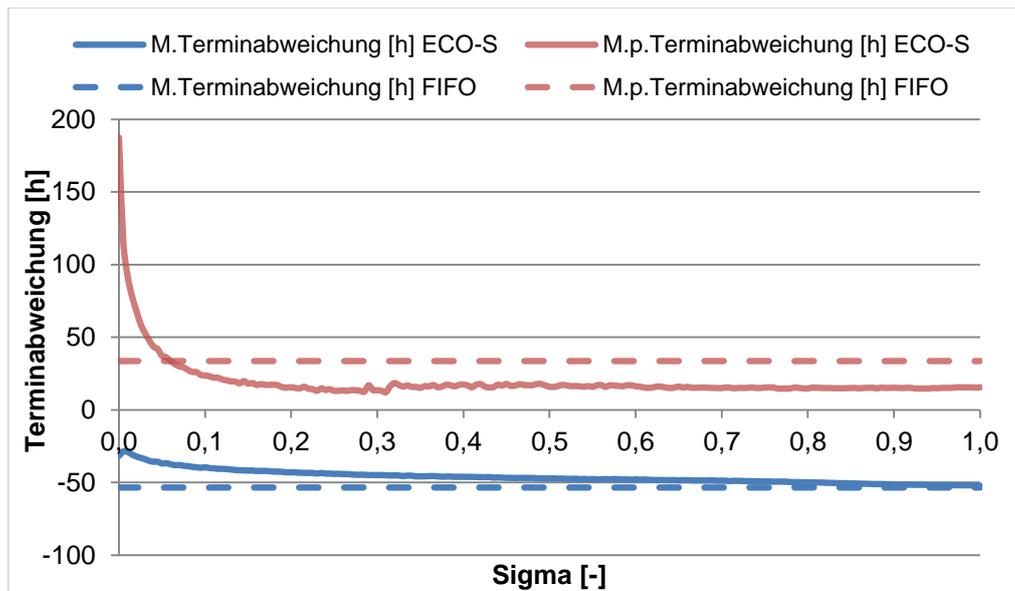


Abbildung 28: Auswirkungen von Sigma auf die mittlere und die mittlere positive Terminabweichung

Im Folgenden werden die Leistungsschwankungen, der Anteil des fixen Energieverbrauches, der rollierende Strompreismedian, die mittlere Losgröße, das Bestandsniveau sowie die Strompreisschwankungen variiert und die Auswirkungen auf die Energiekosteneinsparungen gegenüber FIFO untersucht.

Leistungsschwankungen

Synonym zur EAnT wurden die produkt- und arbeitssystemspezifischen mittleren elektrischen Leistungen durch eine Abzinsung gegenüber dem gewichteten Mittelwert verändert.

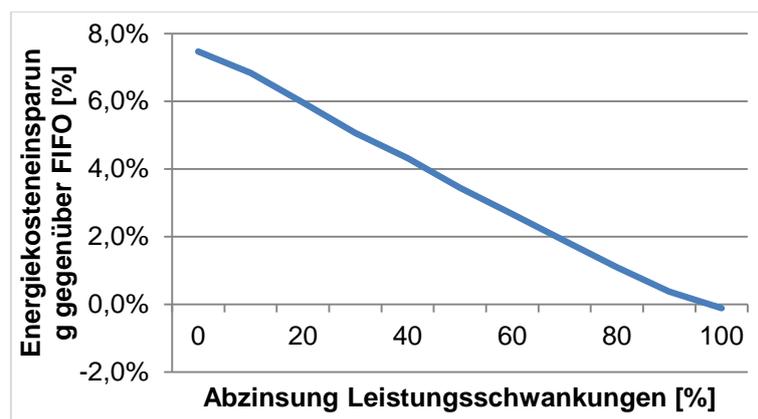


Abbildung 29: Energiekosteneinsparung durch ECO-S bei Veränderung der Leistungsschwankung

Es ist zu erkennen, dass durch je Arbeitssystem stark schwankende mittlere elektrische Leistungen die höchsten Energiekosteneinsparungen möglich sind und mit zunehmendem Abzinsungsfaktor linear abnehmen. Sind die mittleren elektrischen Leistungen an jedem Arbeitssystem jedoch konstant, hat eine Veränderung der

Reihenfolge anhand des Energiepreises keine Auswirkungen auf die Energiekosten. Eine Energiekosteneinsparung gegenüber FIFO wird an dieser Stelle nicht erreicht.

Fixer Energieverbrauch

Der Anteil des fixen Energieverbrauches gegenüber dem variablen Anteil wurde erhöht, wodurch sich der variable Anteil des Gesamtenergieverbrauches immer weiter reduziert.

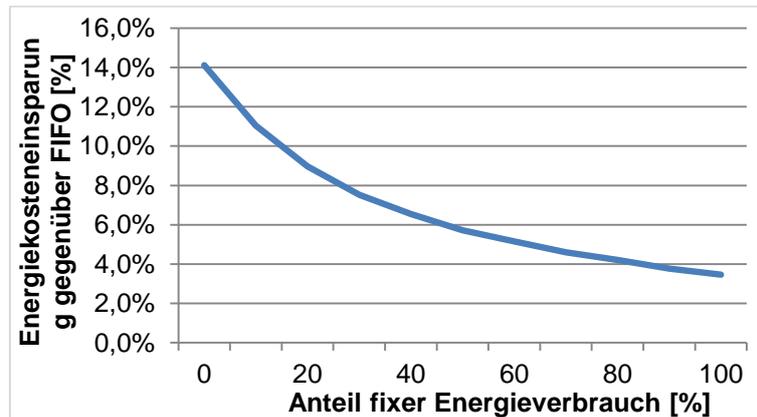


Abbildung 30: Energiekosteneinsparung durch ECO-S bei steigendem Anteil des fixen Energieverbrauches

Mit zunehmendem Anteil an fixer mittlerer elektrischer Leistung nehmen auch die Energiekosteneinsparungen gegenüber FIFO regressiv ab. Liegt kein fixer Anteil an Energieverbrauch (nur variable elektrische Leistung) vor, sind die höchsten Energiekosteneinsparungen zu erreichen. Wird der Anteil des fixen Energieverbrauches deutlich größer als 100% werden keine Energiekosten eingespart.

Rollierender Strompreismedian

Bei einer Veränderung der Länge des Berechnungsintervalls für den rollierenden Strompreismedian ist zu erkennen, dass ein kurzes Berechnungsintervall wenig Energiekosteneinsparungen ermöglicht. Der zugrunde gelegte Zeitraum ist möglicherweise kürzer als die Bearbeitungszeit mancher Aufträge. Hoch- oder Niederpreisphasen werden bei einem zu großen Berechnungsintervall nicht mit berücksichtigt werden, wodurch die Energiekosteneinsparungen mit steigendem Intervall weiter abnehmen. Die höchste Energiekosteneinsparung ist bei einem Berechnungsintervall von 10 Tagen erreicht.

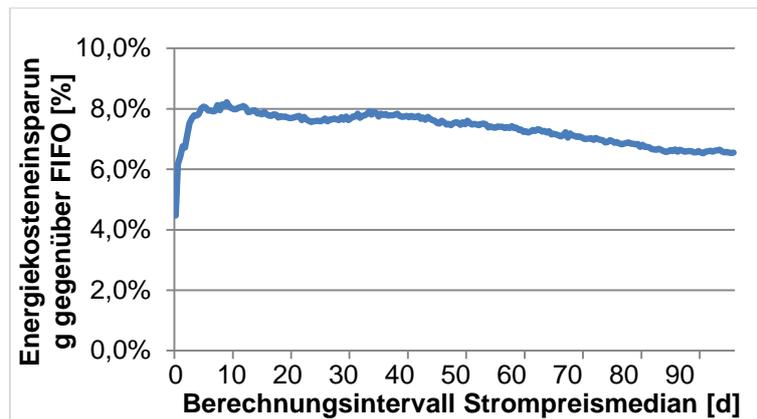


Abbildung 31: Energiekosteneinsparung durch ECO-S bei Veränderung des Berechnungsintervalls des rollierenden Strompreismedians

Mittlere Losgröße

Zur Darstellung der Auswirkungen der mittleren Bearbeitungszeit auf die Energiekosten wurde die mittlere Losgröße bei konstantem Variationskoeffizienten erhöht. Mit steigender mittlerer Bearbeitungszeit nimmt die Energiekosteneinsparung linear ab. Bei einer mittleren Losgröße von 13, welcher einer mittleren Bearbeitungszeit pro Arbeitssystem von 1 Stunde entspricht, sind Energiekosteneinsparungen von 8% gegenüber FIFO erreichbar.

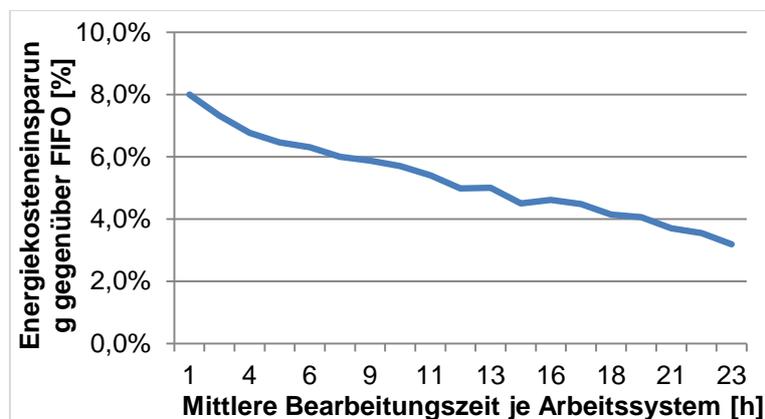


Abbildung 32: Energiekosteneinsparung durch ECO-S bei Veränderung der mittleren Losgröße

Bestandsniveau

Mit einem steigenden Bestandsniveau, also einem höheren mittleren Bestand vor jedem Arbeitssystem, nimmt die Energiekosteneinsparung degressiv zu, da aus einer höheren Anzahl von Aufträgen der nach der entwickelten Reihenfolgeregel energetisch zweckmäßigste Auftrag ausgewählt werden kann. Die Energiekosteneinsparungen scheinen jedoch ab einem Bestand von 50 Stunden nicht weiter zu steigen. An dieser Stelle liegen unter Umständen alle möglichen Auftragskombinationen vor.

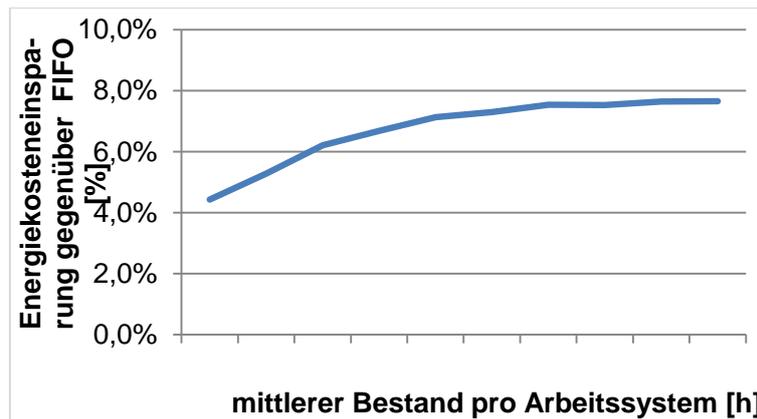


Abbildung 33: Energiekosteneinsparung durch ECO-S bei Veränderung des Bestandsniveaus der Fertigung

Strompreisschwankungen

Ähnliche Ergebnisse wie bei der EAnT weist ECO-S bei der Verringerung der Strompreisschwankungen auf. Liegt ein realer Strompreis mit starken Schwankungen vor sind die höchsten Einsparungen an Energiekosten gegenüber FIFO erzielbar. Die Einsparungen nehmen jedoch mit zunehmendem Abzinsungsfaktor und damit sinkender Schwankung der Strompreise linear ab. Bei einem konstanten Strompreis von 3,09 cent/kWh werden keine Energiekosteneinsparungen erzielt.

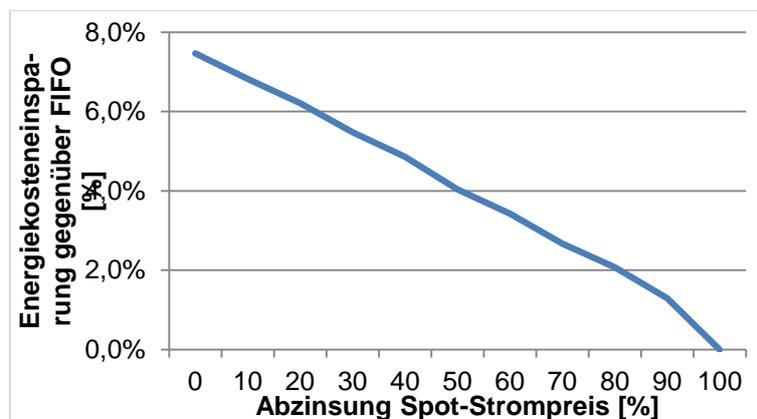


Abbildung 34: Energiekosteneinsparung durch EAnT bei Veränderung der Strompreisschwankungen

4.3.4 Ergebnisse der Validierung der energiekostenorientierten Rückstandsregelung

Nach der Integration der Rückstandsregelung sowie der ECO-BC wurde zunächst die mittlere Losgröße auf 5 reduziert, um nicht so große Rückstands ausschläge zu erzeugen. Die beiden Rückstandsregelungen wurden so implementiert, dass der Rückstand an jedem Arbeitssystem gemessen und Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung an jedem Arbeitssystem einzeln durchgeführt werden können. Die Entscheidung über eine Kapazitätsanpassung wird jeden Tag am Abend 3 Stunden vor

Schichtende getroffen.

Für eine geeignete Parameterkonfiguration wurden im Folgenden die erweiterten logistischen Zielgrößen aufgenommen.

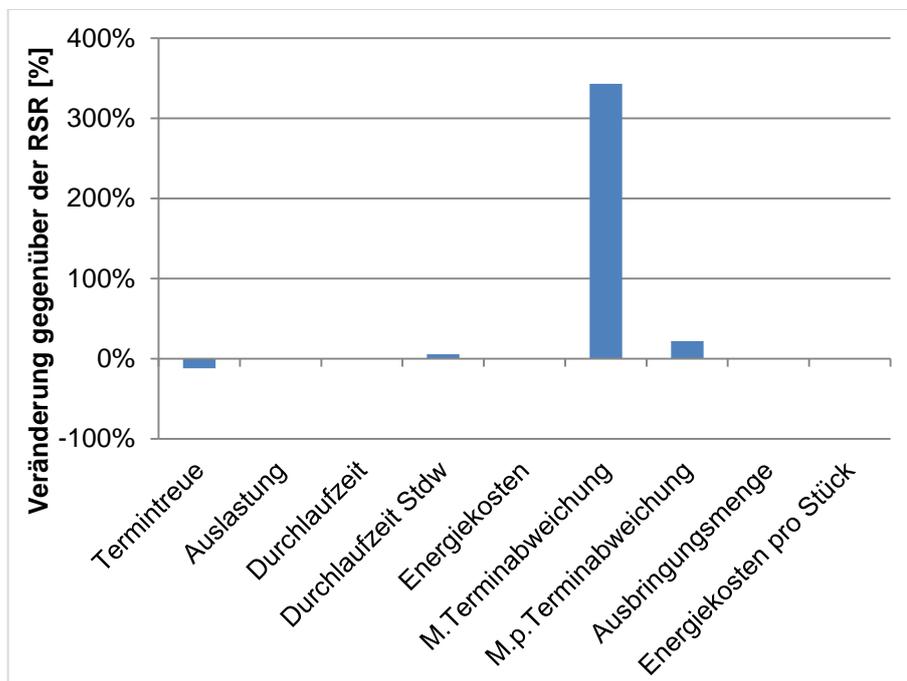


Abbildung 35: Auswirkungen der ECO-BC auf die erweiterten logistischen Zielgrößen

Es ist zu erkennen, dass durch die mögliche spätere Durchführung der Maßnahme zur Kapazitätsanpassung die Termintreue deutlich abnimmt, in Folge der dreieinhalbfachen mittleren Terminabweichung gegenüber der klassischen Rückstandsregelung. War bei der klassischen Rückstandsregelung die mittlere Terminabweichung noch negativ (im Mittel kommen alle Aufträge zu früh), ist sie nun positiv (im Mittel kommen alle Aufträge zu spät). Sowohl die Standardabweichung der Durchlaufzeit als auch die mittlere positive Terminabweichung nehmen zudem deutlich zu. Die Ausbringungsmenge, die Auslastung und auch die mittlere Durchlaufzeit sind konstant. Eine Energiekosteneinsparung wird nur in Höhe von 0,27% erreicht.

Verzinsungsfaktor

Der Verzinsungsfaktor beschreibt die Präferenz eines früheren Starttermins für eine Maßnahme zur Kapazitätsanpassung. Bei einem geringen Verzinsungsfaktor ist die Energiekosteneinsparung am höchsten, da auch an den kommenden Tagen Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung durchgeführt werden können. Mit steigendem Verzinsungsfaktor nehmen die Energiekosteneinsparungen ab. Bei einem Verzinsungsfaktor von 100% wird die Maßnahme immer am ersten Tag, also nach der Reaktionszeit, durchgeführt, wodurch sich keine Energiekosteneinsparungen ergeben.

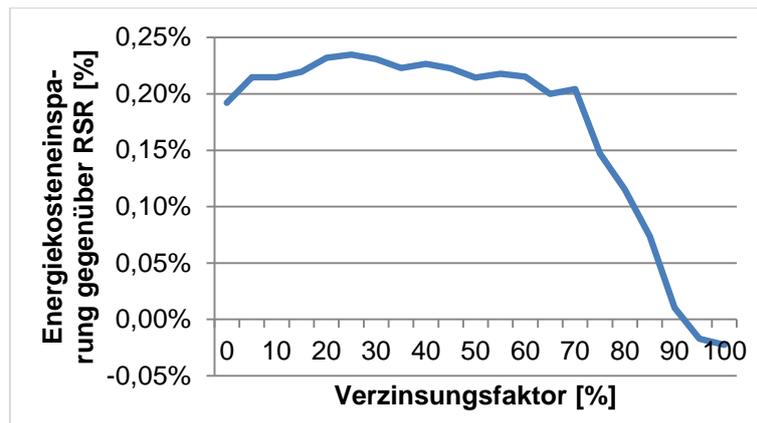


Abbildung 36: Energiekosteneinsparung durch ECO-BC bei Veränderung des Verzinsungsfaktors

Die sogar leicht höheren Energiekosten resultieren aus Zufallsereignissen, da sich bei einem Verzinsungsfaktor von 100% aufgrund der zusätzlichen Grenze nicht automatisch die klassische Rückstandsregelung ergibt.

Entscheidungshorizont

Der Entscheidungshorizont gibt an, innerhalb von wie vielen Tagen die Maßnahme zur Kapazitätsanpassung durchgeführt sein muss. Bei einem kurzen Entscheidungshorizont bleibt ECO-BC wenig zeitlicher Spielraum, wodurch keine Energiekosteneinsparungen entstehen. Mit steigendem Entscheidungshorizont sind steigende Einsparungen möglich, da nun mehr Tage zur Auswahl des Startzeitpunktes einer Maßnahme zur Verfügung stehen und somit zielgerichteter Zeiten geringer Energiepreise (bei Kapazitätserhöhungen) bzw. Zeiten hoher Energiepreise (bei Kapazitätsreduktionen) ausgewählt werden können. Bei einem unterstellten degressiven Verlauf wird jedoch eine gewisse Einsparung nicht überschritten.

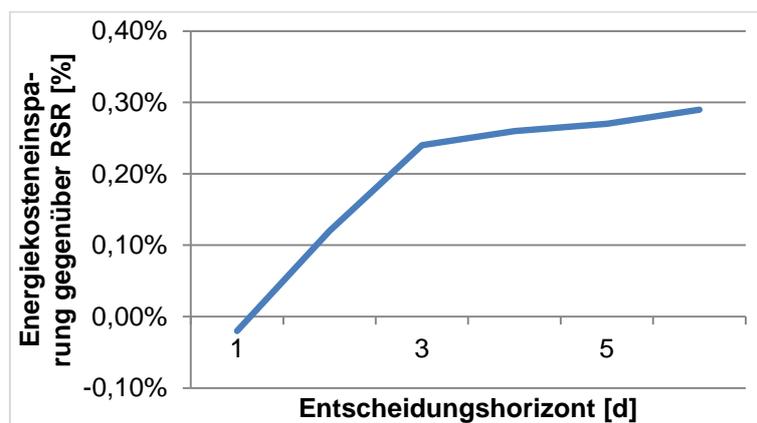


Abbildung 37: Energiekosteneinsparung durch ECO-BC bei Veränderung des Entscheidungshorizontes

Auslöserückstand

Der Auslöserückstand beschreibt die Grenze, bei der durch einen Rückstand die ECO-BC außer Kraft gesetzt und die klassische Rückstandsregelung durchgeführt wird. Im Folgenden wurde die Differenz zwischen dem oberen und unteren Auslöserückstand und dem oberen und unteren Melderückstand, ab dem die ECO-BC wirkt, vergrößert.

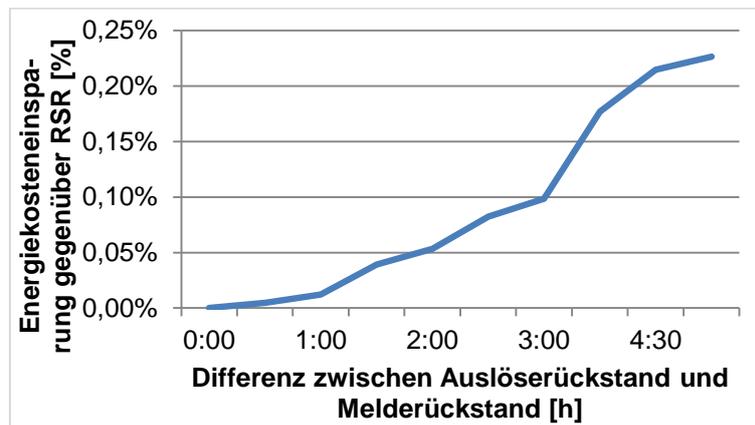


Abbildung 38: Energiekosteneinsparung durch ECO-BC bei Veränderung des Auslöserückstandes

Eine Veränderung erfolgt hierbei nur über den Auslöserückstand (der untere Melderückstand lag kontinuierlich bei -10 Stunden und der obere Melderückstand bei 1 Stunde). Es ist zu erkennen, dass mit steigender Differenz der Handlungsspielraum für die ECO-BC steigt (vgl. Abbildung 12) und somit mehr Energiekosteneinsparungen möglich sind. Sofern der Auslöserückstand dem Melderückstand entspricht, wird nie die ECO-BC ausgelöst, wodurch keine Energiekosteneinsparungen erzielt werden.

Melderückstand

Der Melderückstand ist die Rückstandsgrenze, ab der eine Kapazitätsanpassung durch ECO-BC durchgeführt wird. In der Simulationsstudie wurde dafür der obere Melderückstand schrittweise vergrößert. Der obere Auslöserückstand lag konstant bei 5 Stunden. Dies führt dazu, dass erst später und damit seltener eine Kapazitätsreduktion durch die ECO-BC angestoßen wird. Je häufiger eine Kapazitätsanpassung ausgeführt werden kann (geringerer oberer Melderückstand), desto mehr Energiekosten können eingespart werden.

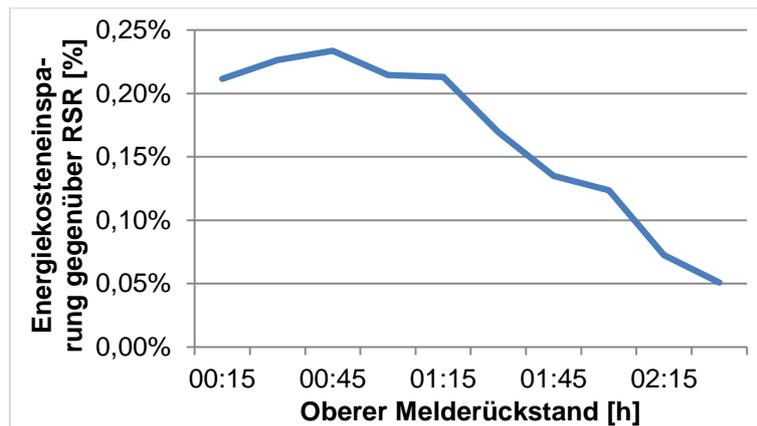


Abbildung 39: Energiekosteneinsparung durch ECO-BC bei Veränderung des Melderückstandes

Strompreisschwankungen

Bei einem stark volatilen Strompreis sind die einzusparenden Energiekosten gegenüber der klassischen Rückstandsregelung am höchsten. Mit abnehmenden Schwankungen nehmen auch die Energiekosteneinsparungen nahezu linear ab. Bei einem konstanten Strompreis werden keine Energiekosten eingespart.

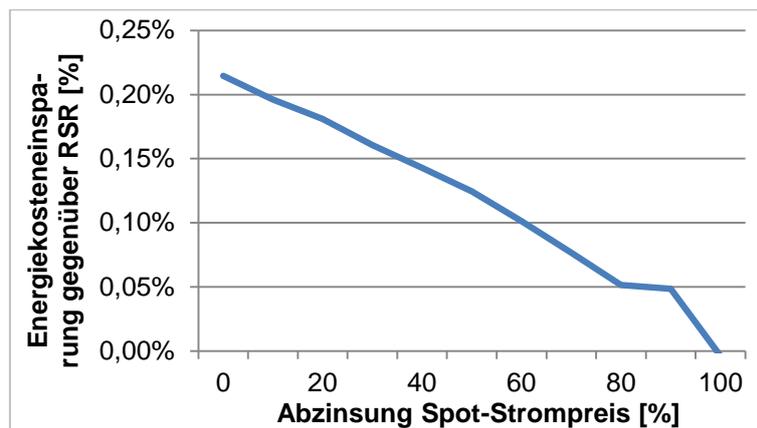


Abbildung 40: Energiekosteneinsparung durch ECO-BC bei Veränderung der Strompreisschwankungen

4.4 Kritische Diskussion

Die energiekostenorientierte Auftragsfreigabe nach Termin erreicht im vorliegenden Simulationsmodell Energiekosteneinsparungen von über 4%, wobei eine Berücksichtigung der resultierenden Energiekosten nur am jeweils ersten Arbeitssystem des betrachteten Auftrages erfolgt. Voraussetzung für die Anwendung sind vor allem Leistungs- und Strompreisschwankungen, möglichst geringe Losgrößen sowie die Kenntnis des zukünftigen Strompreises. Die Energiekosteneinsparungen führen jedoch zu in Summe leicht verschlechterten logistischen Zielgrößen, da die Aufträge nicht in der geplanten Reihenfolge freigegeben werden. Eine Anwendung des Ver-

fahrens sollte angestrebt werden, sofern das erste Arbeitssystem der betrachteten Aufträge einen hohen Energieverbrauch aufweist.

Die energiekostenorientierte Reihenfolgebildung weist die gleichen Anwendungsvoraussetzungen wie die energiekostenorientierte Auftragsfreigabe auf, wobei zusätzlich ein Bestand vor den jeweiligen Arbeitssystemen vorhanden sein muss. In Abhängigkeit des zu wählenden Sigma-Faktors sind Energiekosteneinsparungen von über 15% im vorliegenden Modell nachgewiesen worden. Die Durchlaufzeit durch die Anwendung der entwickelten Reihenfolgeregel erhöht sich nur leicht. Somit sind die negativen Auswirkungen auf die logistischen Zielgrößen sehr gering. Demnach wird die Anwendung des Verfahrens unter den genannten Voraussetzungen in energieintensiven Unternehmen empfohlen, da es systematisch die Energiekosten jedes Arbeitssystems senken kann ohne die logistischen Zielgrößen zu gefährden.

Die geringsten Energiekosteneinsparungen werden durch die energiekostenorientierte Rückstandsregelung erzielt. Lediglich 0,27% an Energiekosten können im Simulationsmodell eingespart werden. Dies führt jedoch zu einer enormen Erhöhung der mittleren Terminabweichung und damit zu einer starken Verschlechterung der Termintreue. Eine Anwendung des Verfahrens wird daher nicht empfohlen, da die Einsparungen an Energiekosten die Verschlechterung der logistischen Zielgrößen nicht ausgleichen.

5. Innovativer Beitrag und wirtschaftlicher Nutzen

5.1 Voraussichtliche Nutzung der angestrebten Forschungsergebnisse

Durch die Anwendung der erweiterten Fertigungssteuerungsverfahren lassen sich Energiekosten senken, ohne teilweise eine deutliche Verschlechterung logistischen Zielgrößen in Kauf nehmen zu müssen. Vor allem die Verfahren zur Auftragsfreigabe und Reihenfolgebildung können branchenübergreifend in der Fertigungssteuerung produzierender Unternehmen eingesetzt werden. Die Einfachheit der Verfahren macht den Einsatz auch für KMU interessant. Allerdings werden für die Verfahren die mittleren Energieverbräuche der einzelnen Aufträge benötigt. Da aber in KMU, als auch in der überwiegenden Mehrheit der größeren Unternehmen, standardmäßig keine Energiezähler oder Messgeräte den Energieverbrauch einzelner Maschinen und Anlagen erfassen oder die mittleren auftragspezifischen Energieverbräuche bekannt sind, stellt dies ein Hindernis für die kurzfristige Anwendung der Projektergebnisse dar. Eine weitere Schwierigkeit für die direkte Umsetzung der Forschungsergebnisse liegt bei der fehlenden Existenz schwankender Energiepreise. Aufgrund des hohen Aufwandes zum Bezug von Energie an der Strombörse beziehen KMU heute hauptsächlich Strom zu konstanten oder zweistufigen Strompreisen. Lediglich große Unternehmen haben eigene Abteilungen, welche sich um den Energiebezug kümmern. Wie jedoch unter 4.1.1. dargestellt ist mittelfristig durch die Erhöhung des Anteils an erneuerbaren Energien eine Anpassung der Stromnachfrage an das Angebot nötig. Zeitvariable Stromtarife tragen diesem Sachverhalt Rechnung, werden vom Gesetzgeber bereits gefordert und in naher Zukunft vermehrt Einzug in Privathaushalte und die Industrie finden.

5.2 Möglicher Beitrag zur Steigerung der Leistungs- und Wettbewerbsfähigkeit kleiner und mittlerer Unternehmen

Die energiekostenorientierten Fertigungssteuerungsverfahren bieten KMU die Möglichkeit zur Reduzierung der Energiekosten. Hierfür werden so gut wie keine zusätzlichen Investitionen benötigt. Die Mittel für die Beschaffung von Messeinrichtungen müssen die Unternehmen mittelfristig tätigen, um eine Zertifizierung nach ISO 50001 zu erreichen. Das Kostensenkungspotential durch die entwickelten Verfahren ist jedoch stark unternehmensabhängig. Insbesondere die bezogene Gesamtenergie- menge sowie die auftrags- und arbeitssystemspezifischen Leistungsdifferenzen beeinflussen die Höhe des Potentials zur Energiekostensenkung. Aber gerade vor dem Hintergrund weiter zunehmender und volatiler werdender Energiepreise wird

dieses Potential zukünftig ansteigen und kann somit die Finanzierungssituation sowie die Wettbewerbsfähigkeit von KMU positiv beeinflussen.

6. Verwendung der Zuwendung

Das Projekt wurde am IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover gemeinnützige GmbH vom 01.12.2013 bis zum 31.12.2015 von einem wissenschaftlichen Mitarbeiter (TVL E 13) mit fundierten Kenntnissen im Bereich der Produktionslogistik bearbeitet. Der wissenschaftliche Mitarbeiter ist während der Projektlaufzeit im Umfang 24 Monaten durch eine studentische Hilfskraft unterstützt worden. Bei der Implementierung der Verfahren in das Simulationsmodell ist der wissenschaftliche Mitarbeiter von einem weiteren wissenschaftlichen Mitarbeiter mit umfangreicher Simulationserfahrung im Umfang von fünf Monaten unterstützt worden.

7. Umsetzung der Forschungsergebnisse / Transfer der Ergebnisse in die Wirtschaft

Erste Schritte zum Ergebnistransfer sind während der Projektlaufzeit durchgeführt worden. Weitere Maßnahmen zur Verwertung und Verbreitung der Projektergebnisse sind im Anschluss an das Projekt vorgesehen. Über den Austausch zwischen Forschungsstelle und den Unternehmen des projektbegleitenden Ausschusses sowie weiteren interessierten Unternehmen hat bereits ein erster Wissenstransfer stattgefunden. Dieser ist die Basis für die praktische Umsetzbarkeit der Ergebnisse. Die Mitglieder des PA sind in der untenstehenden Tabelle 1 aufgeführt:

Tabelle 1: Mitglieder des projektbegleitenden Ausschusses

Unternehmen	KMU	Ansprechpartner	Telefonnummer
GTT Gesellschaft für Technologietransfer mbH	X	Herr Nyhuis	0511-279470
Grean GmbH	X	Herr Heinen	0511-76218291
KB Schmiedetechnik GmbH	X	Herr Eggert	0233-10350865
VEA Beratungs-GmbH	X	Herr Pietsch	0511-9848138
Voith Turbo GmbH & Co. KG		Herr Meyer	07951-32533

Die bereits durchgeführten und noch geplanten Transfermaßnahmen sind dem Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft in Tabelle 2 zu entnehmen.

Tabelle 2: Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft (spezifische durchgeführte und geplante Transfermaßnahmen)

Maßnahme	Ziel	Rahmen	Zeitraum
Im Berichtszeitraum umgesetzte Transfermaßnahmen			
Projektbegleitender Ausschuss	Fortlaufende Diskussion der Projektergebnisse im PA	Vorstellung des Projekts, der geplanten Ergebnisse und Diskussion der geplanten Arbeiten	03/2014
		Vorstellung der Ergebnisse und Diskussion bei Partnern des PA	kontinuierlich
		Abschlusspräsentation	12/2015
Veröffentlichung, Information der interessierten Öffentlichkeit	Ergebnistransfer in die Wirtschaft	Einrichtung einer Projekthomepage (www.EnKoFer.de)	02/2014
		Veröffentlichung einer Pressemitteilung (http://www.iph-hannover.de/media/files/pressemitteilungen/IPH_Pressemitteilung_2014-02-27_EnKoFer.pdf)	02/2014
		Veröffentlichung des Leitfadens zur Anwen-	01/2016

		<p>derung der Fertigungssteuerungsverfahren http://www.iph-hannover.de/ media/files/ downloads/Projekt_EnKoFer_Leitfaden_2016-02-04.pdf</p>	
		<p>Veröffentlichung: Willeke, S.; Wesebaum, S.; Ullmann, G.; Nyhuis, P.: Energiekosteneffiziente Fertigungssteuerung. In: ZWF – Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Carl Hanser Verlag, 109. Jg. (2014), H. 5, S. 328-331.</p>	05/2014
		<p>Veröffentlichung: Willeke, S.: Die Energiewende nutzen In: IPH - Jahresbericht 2014.</p>	03/2015
		<p>Veröffentlichung: Willeke, S.; Nyhuis, P.: Energiekosten sparen mit zeitvariablen Tarifen. In: IT&Production, TeDo Verlag, 16. Jg. (2015) H. 3, S. 102-103. ISSN 1439-7722</p>	03/2015
		<p>Veröffentlichung: Willeke, S.; Wesebaum, S.; Ullmann, G.: Integration zeitvariabler Energiekosten in die Belastungsorientierte Auftragsfreigabe. In: Logistics Journal, Vol. 2015, DOI:10.2195/lj_NotRev_willeke_de_201507_01, 06.07.2015.</p>	07/2015
		<p>Veröffentlichung: Willeke, S.; Wesebaum, S.; Ullmann, G.; Nyhuis, P.: Energiekostenorientierte Reihenfolgebildung. In: ZWF – Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Carl Hanser Verlag, 110. Jg. (2015) H. 9, S. 495-499. ISSN 0947-0085</p>	09/2015
		<p>Veröffentlichung: Willeke, S.: Energiekosten sparen ohne teure Investitionen. In: phi – Produktionstechnik Hannover informiert, Newsletter Nr. 9 / Dezember 2015, 01.12.2015. ISSN 2198-1922</p>	12/2015
		<p>Veröffentlichung: Willeke, S.; Nyhuis, P.: Steuerung der Produktionskapazitäten unter Energiepreisen. In: IT&Production, TeDo Verlag, 16. Jg. (2015) H. 12, ISSN 1439-7722</p>	12/2015
		<p>Veröffentlichung: Willeke, S.; Nyhuis, P.: Method for an Energy-Cost-Oriented Manufacturing Control to Reduce Energy Costs. In: ICIMSA 2016 International Conference on Industrial Engineering, Management Science and Applications 2016, Republic of Korea, (akzeptiert).</p>	05/2016

Weiterbil- dung wäh- rend der Projektlauf- zeit	Betreuung studentischer Arbeiten	Betreuung der Masterarbeit „Weiterentwicklung eines Fertigungssteuerungsverfahrens für kleine und mittlere Unternehmen um den Aspekt der Energiekosten“, David Pieczka, Leibniz Universität Hannover	03/2014 bis 09/2014
		Betreuung der Masterarbeit „Entwicklung von Energiekostenfunktionen für energieintensive Produktionsanlagen unter Berücksichtigung dynamischer Tarifmodelle“, Daniel Schröder, Leibniz Universität Hannover	03/2014 bis 09/2014
		Betreuung der Masterarbeit „Entwicklung eines Konzeptes zur Bewertung und Verbesserung der Energieflexibilität in kleinen und mittleren Unternehmen“, Andreas Ilse, Leibniz Universität Hannover	06/2014 bis 12/2014
		Betreuung der Masterarbeit „Simulationsgestützte Analyse von Verfahren der Fertigungssteuerung für kleine und mittlere Unternehmen anhand der um Energiekosten erweiterten logistischen Zielgrößen“, Daniel Grimpe, Leibniz Universität Hannover	09/2014 bis 03/2015
		Betreuung der Bachelorarbeit „Entwicklung einer Methode zur Bewertung der Energieflexibilität von Produktionssystemen in kleinen und mittleren Unternehmen“, Alexander Feige, Leibniz Universität Hannover	1/2015 bis 03/2015
		Betreuung der Bachelorarbeit „Integration zeitvariabler Energiekosten in die Rückstandsregelung als Verfahren der Kapazitätssteuerung, Bachelorarbeit“, Finn Lennart Bahnmann, Leibniz Universität Hannover	04/2015 bis 06/2015
		Betreuung der Masterarbeit „Simulationsgestützte Analyse von energiekostenorientierten Fertigungssteuerungsverfahren für kleine und mittlere Unternehmen“, Kai Schnüchel, Leibniz Universität Hannover	03/2015 bis 09/2015
		Betreuung der Bachelorarbeit „Entwicklung von Wirkmodellen zur Integration schwankender Energiepreise in die Fertigungssteuerung“, Lars Zachert, Leibniz Universität Hannover	10/2015 bis 01/2016

Maßnahme	Ziel	Rahmen	Zeitraum
Nach dem Berichtszeitraum geplante Transfermaßnahmen			
Weiterbildung	Qualifizierung von Mitarbeitern aus KMU	Aufnahme der Projekteinhalte in das Seminarprogramm des IPH	Ab 2016
	Qualifizierung wissenschaftlicher Mitarbeiter des IPH	Weiterverwendung der Projekteinhalte zur Unterstützung der Anfertigung einer Dissertation	Ab 06/2016
	Qualifizierung von Studenten	Übernahme der Projektergebnisse in die vom IPH betreute Vorlesung „Anlagenmanagement“	Ab 04/2016
Veröffentlichung, Information der interessierten Öffentlichkeit	Ergebnistransfer in die Wirtschaft	Veröffentlichung in der Zeitschrift wt Online	05/2016
		Veröffentlichung in der Zeitschrift ZWF – Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb	09/2016
		Veröffentlichung im Journal Production Engineering	01/2017

8. Durchführende Forschungsstelle

Das IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH ist eine gemeinnützige Forschungseinrichtung, die eng mit der Universität Hannover kooperiert. Die Gesellschafter des IPH, Prof. Behrens, Prof. Overmeyer und Prof. Nyhuis, sind gleichermaßen Inhaber produktionstechnischer Lehrstühle an der Universität Hannover. Die Gliederung des IPH in die drei Abteilungen „Prozesstechnik“, „Produktionsautomatisierung“ und „Logistik“ spiegelt die Ausrichtung dieser Lehrstühle wider.

Während die universitären Mutterinstitute des IPH hauptsächlich den Bereich der Grundlagenforschung abdecken, widmet sich das IPH hauptsächlich der anwendungsorientierten Forschung und Entwicklung. Das IPH wurde 1988 mit Unterstützung des niedersächsischen Wirtschaftsministeriums gegründet und ist besonders der technologischen Förderung mittelständischer Industriebetriebe verpflichtet. Der Technologietransfer von der Universität in die Industrie erfolgt dabei hauptsächlich über gemeinsam mit der Industrie durchgeführte, öffentlich geförderte Verbundforschungsprojekte sowie über Fortbildungsseminare und Arbeitskreise für spezielle Zielgruppen aus Industrie und Handel. Darüber hinaus stellt das IPH laufend in einer Vielzahl ausschließlich industriefinanzierter Beratungsprojekte seine Praxisorientierung und Wettbewerbsfähigkeit unter Beweis.

Leiter der Forschungsstelle

IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH

Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Nyhuis

Geschäftsführender Gesellschafter des IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover gemeinnützige GmbH, Hollerithallee 6, 30419 Hannover,
Tel.: 0511/27976-119

Prof. Dr.-Ing. Ludger Overmeyer

Geschäftsführender Gesellschafter des IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover gemeinnützige GmbH, Hollerithallee 6, 30419 Hannover,
Tel.: 0511/27976-119

Prof. Dr.-Ing. Bernd-Arno Behrens

Geschäftsführender Gesellschafter des IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover gemeinnützige GmbH, Hollerithallee 6, 30419 Hannover,
Tel.: 0511/27976-119

Dr.-Ing. Georg Ullmann

Koordinierender Geschäftsführer des IPH – Institut für Integrierte Produktion
Hannover gemeinnützige GmbH, Hollerithallee 6, 30419 Hannover,
Tel.: 0511/27976-119

Projektleiter

M. Sc. Stefan Willeke

Wissenschaftlicher Mitarbeiter der Abteilung Logistik des IPH

9. Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben 17900 N der Bundesvereinigung Logistik (BVL) e.V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Für die Förderung sei an dieser Stelle gedankt.

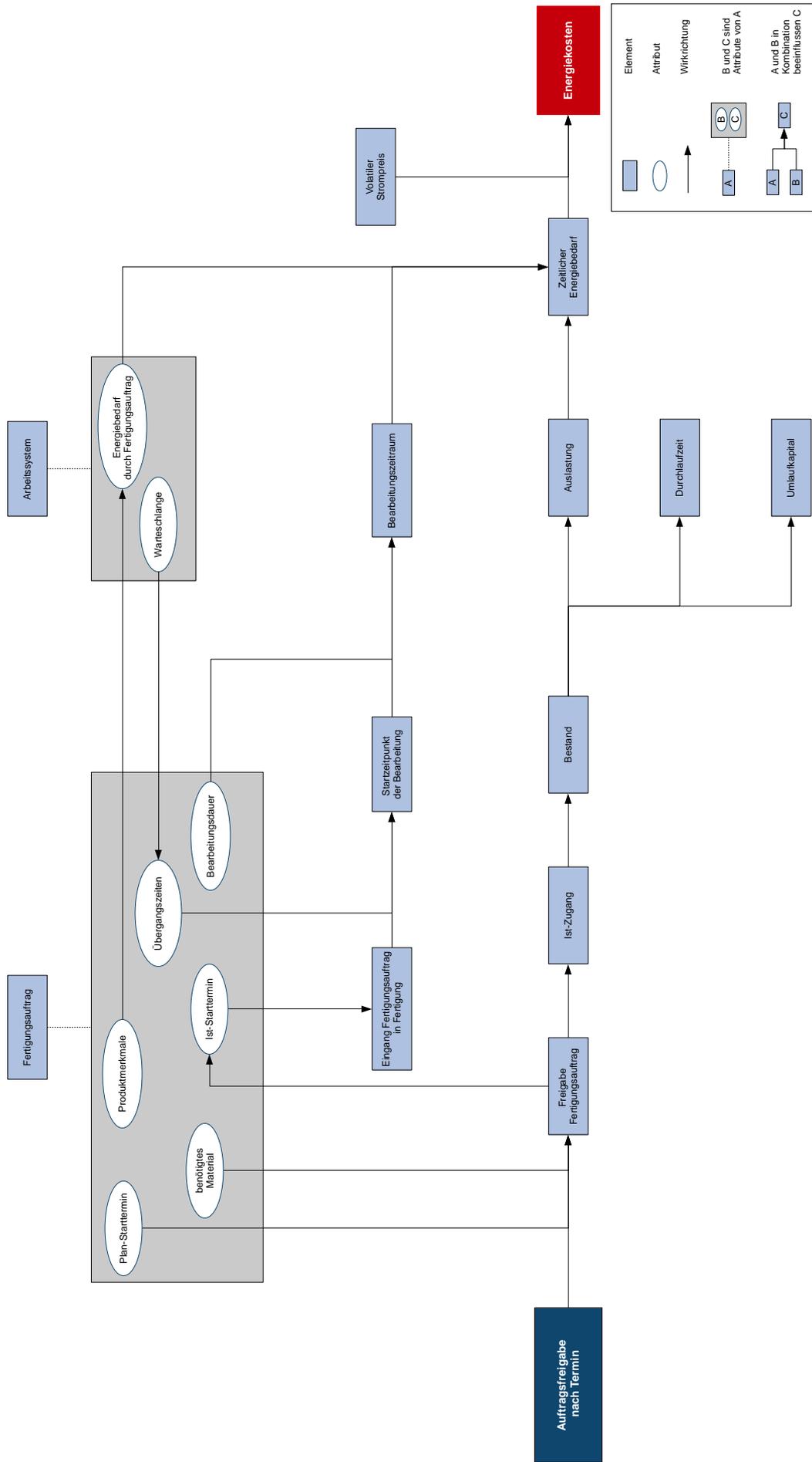


Abbildung 42: Wirkmodell zur Darstellung des Einflusses der Auftragsfreigabe nach Termin auf die Energiekosten

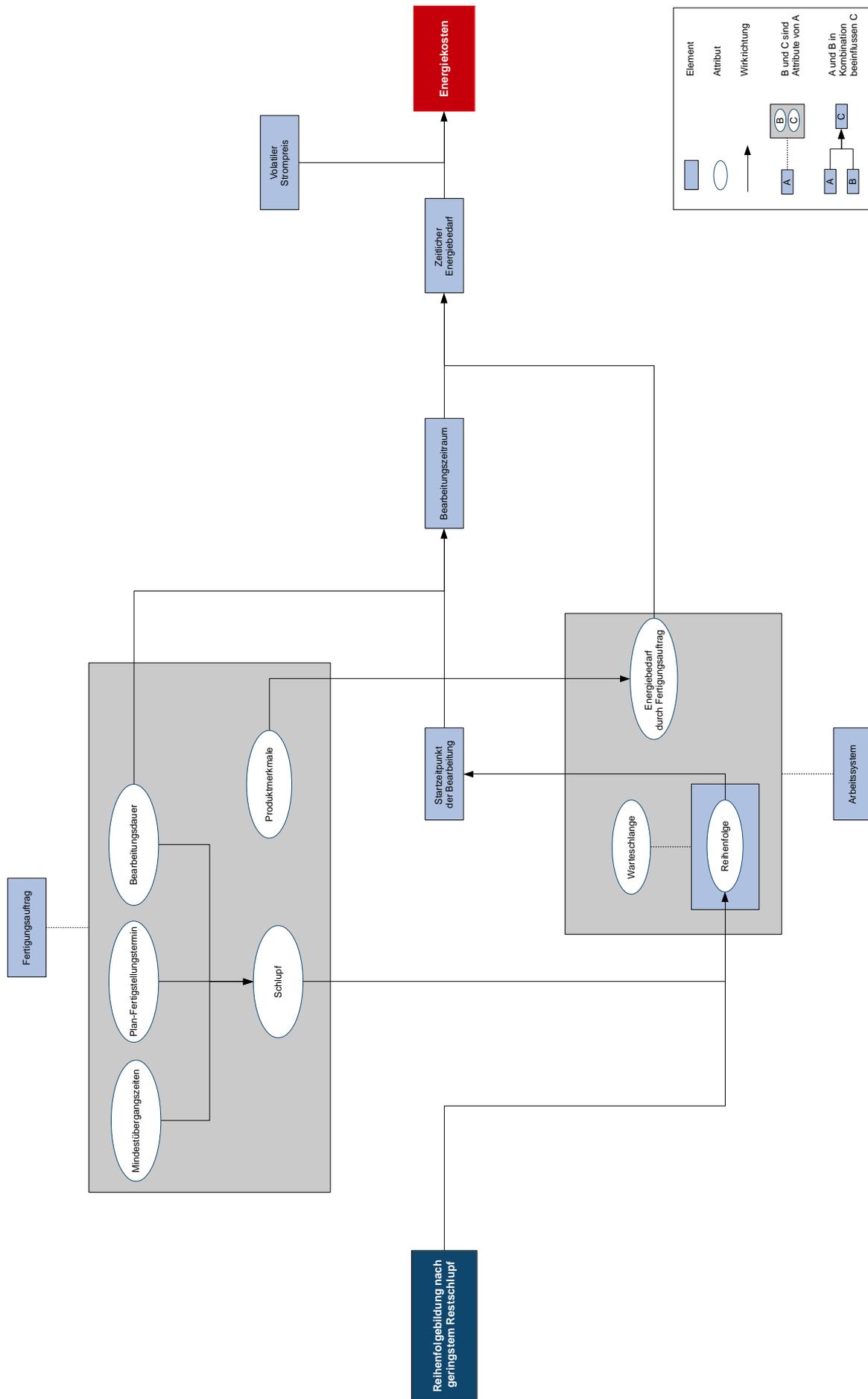


Abbildung 43: Wirkmodell zur Darstellung des Einflusses der geringsten Restschlupf-Regel auf die Energiekosten

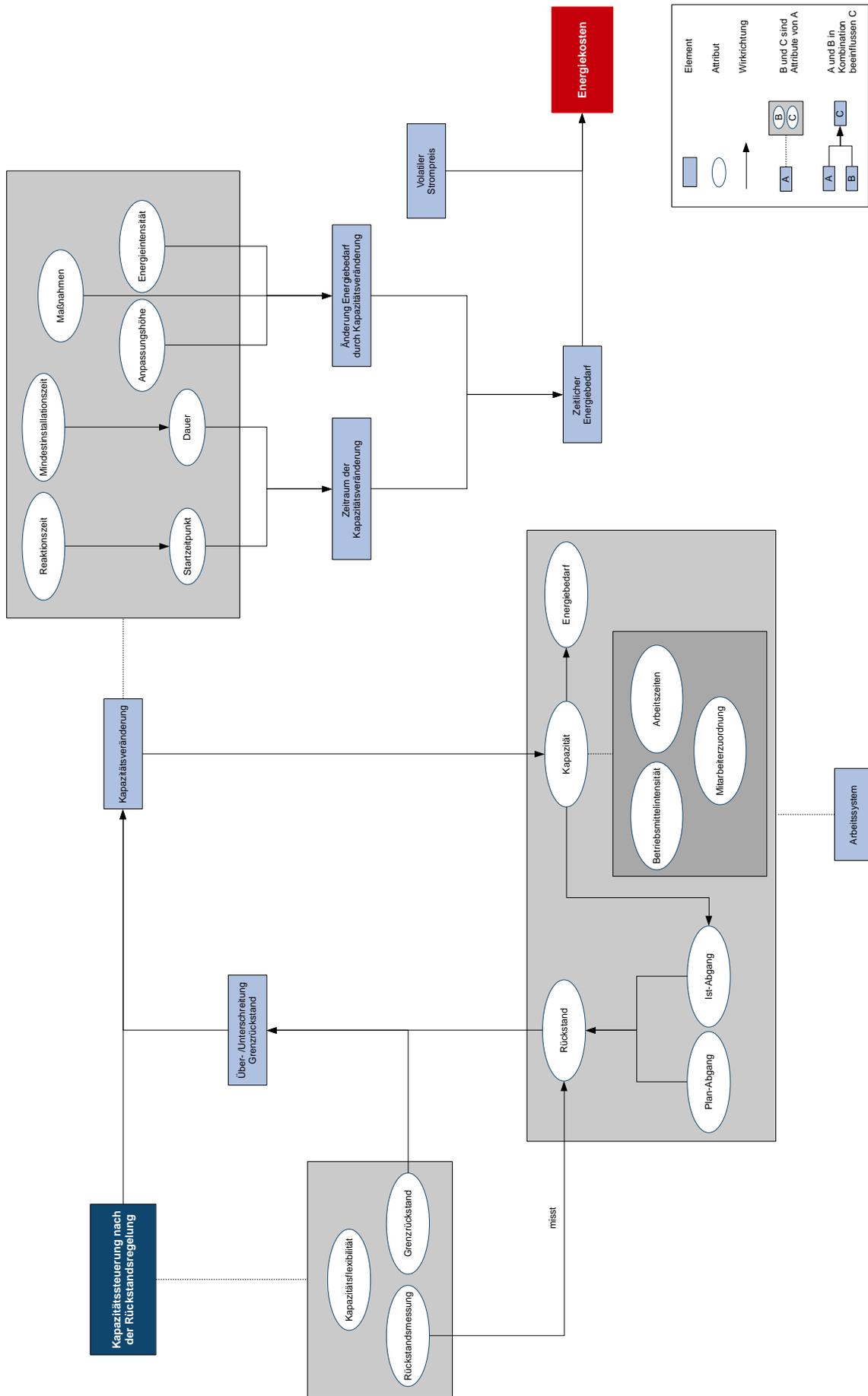


Abbildung 44: Wirkmodell zur Darstellung des Einflusses der Rückstandsregelung auf die Energie-

10.2 Prozessketten der weiterentwickelten Fertigungssteuerungsverfahren

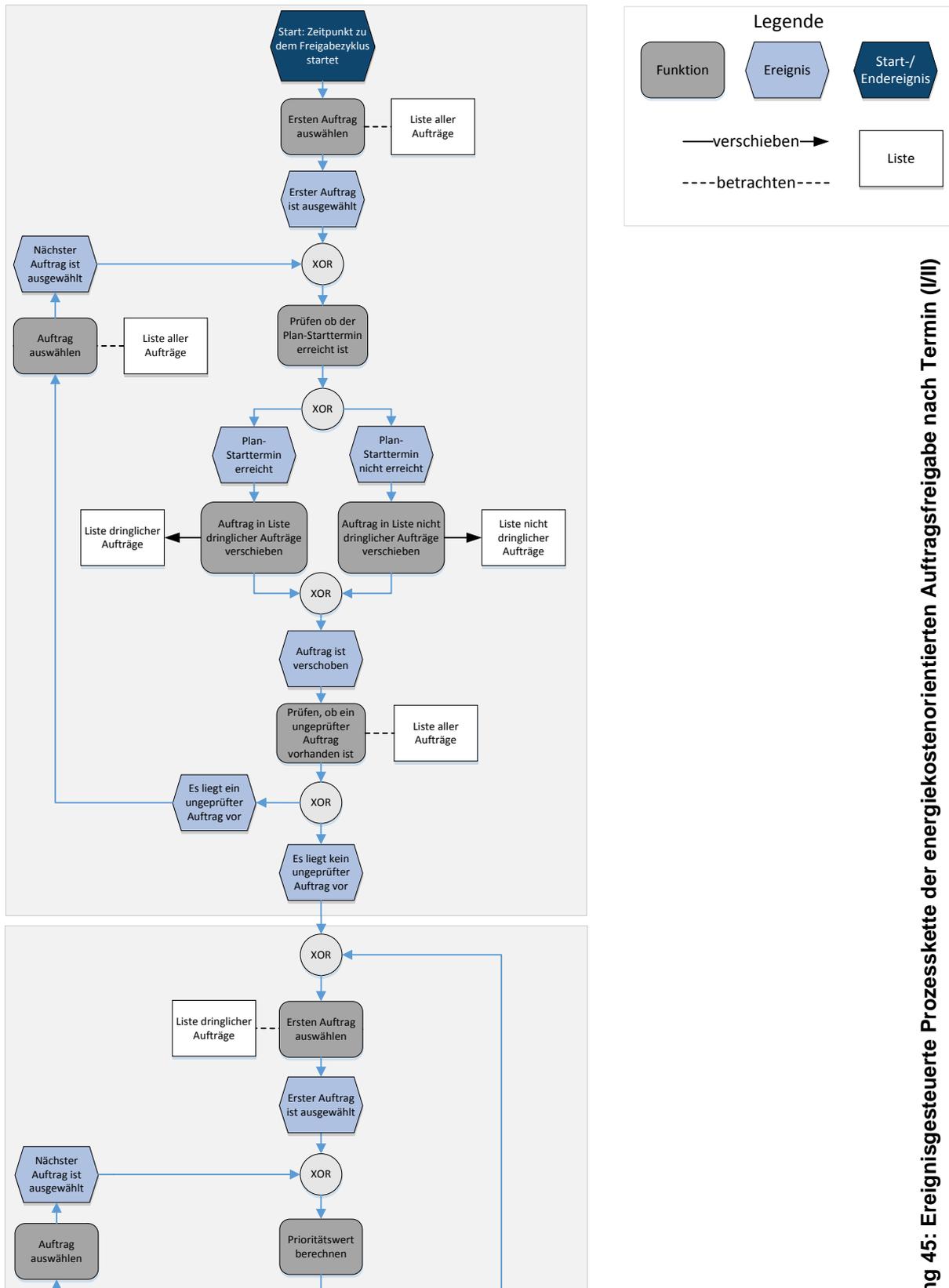


Abbildung 45: Ereignisgesteuerte Prozesskette der energiekostenorientierten Auftragsfreigabe nach Termin (I/II)

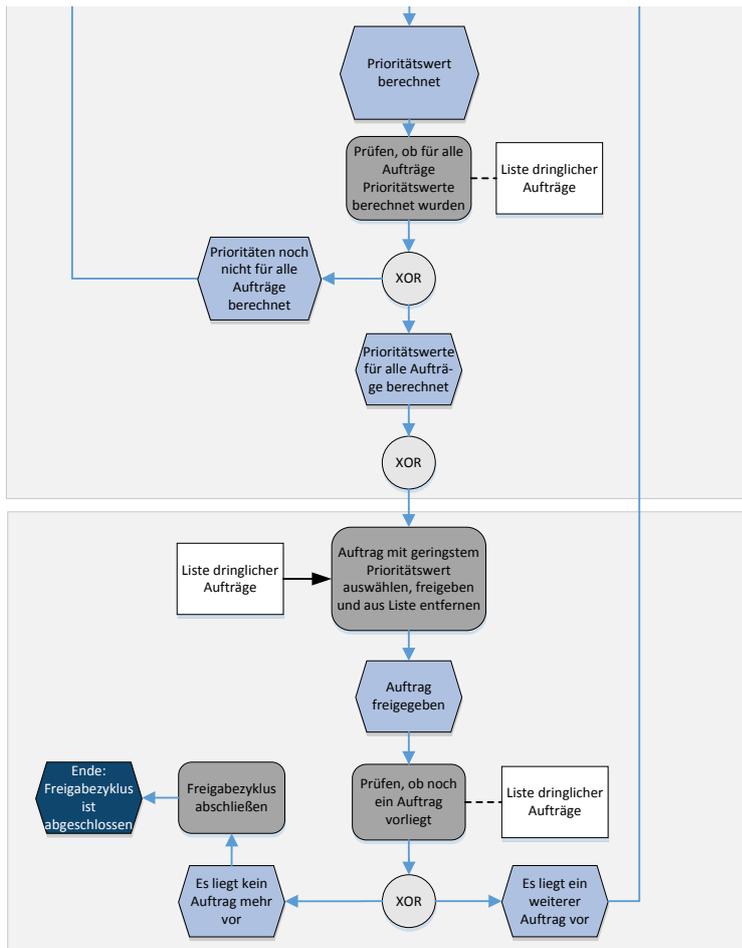


Abbildung 46: Ereignisgesteuerte Prozesskette der energiekostenorientierten Auftragsfreigabe nach Termin (II/II)



Abbildung 47: Ereignisgesteuerte Prozesskette der energiekostenorientierten Reihenfolgebildung (III)

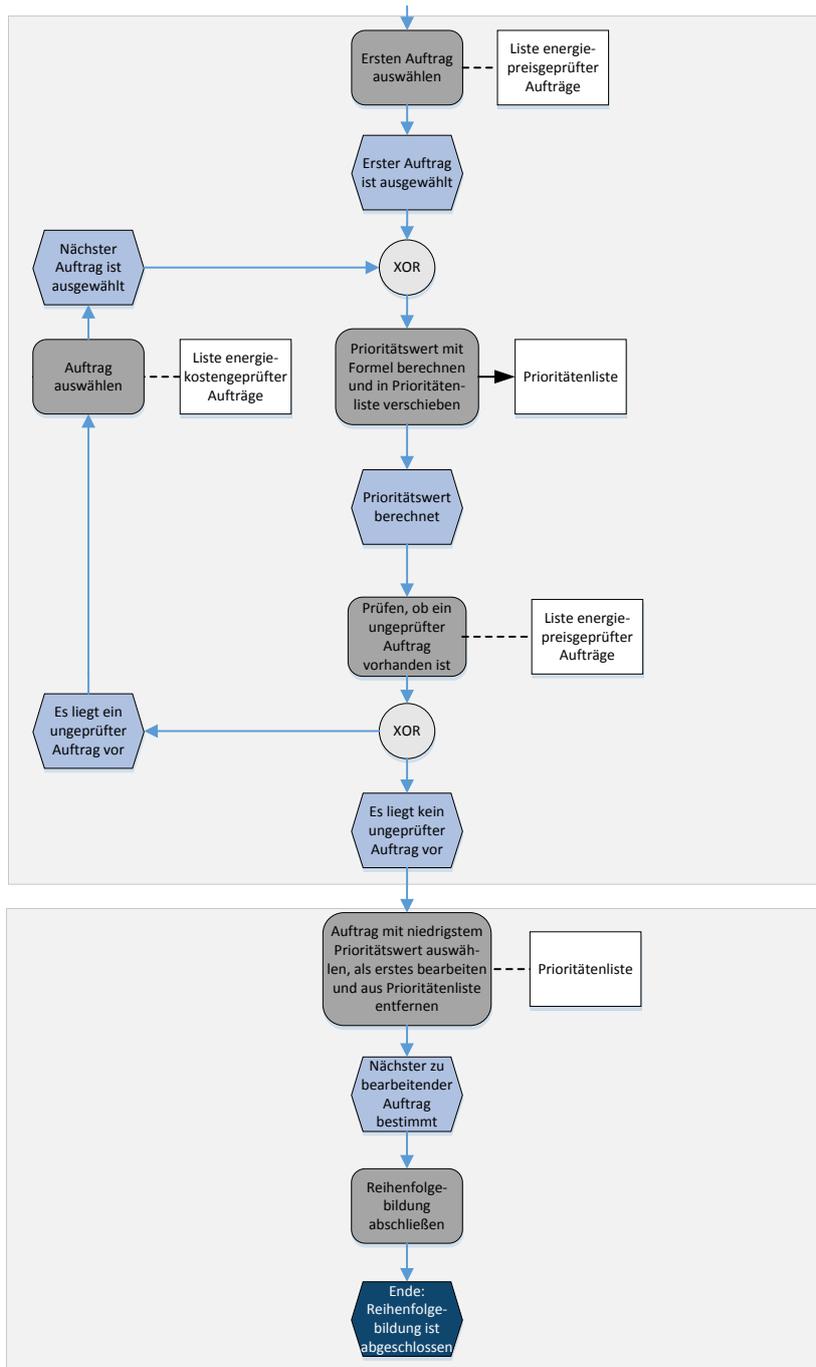


Abbildung 48: Ereignisgesteuerte Prozesskette der energiekostenorientierten Reihenfolgebildung (I/III)

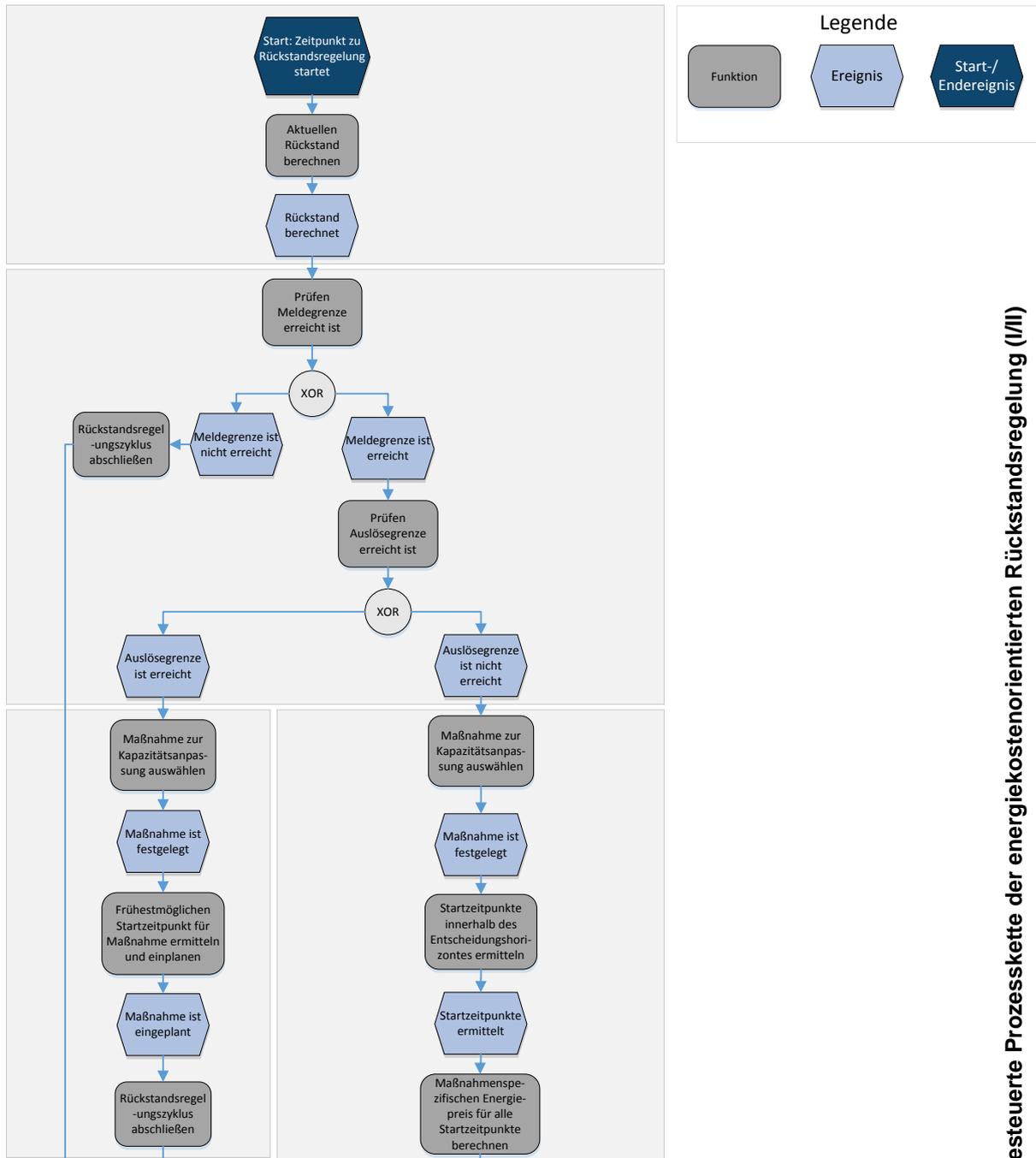


Abbildung 49: Ereignisgesteuerte Prozesskette der energiekostenorientierten Rückstandsregelung (III)

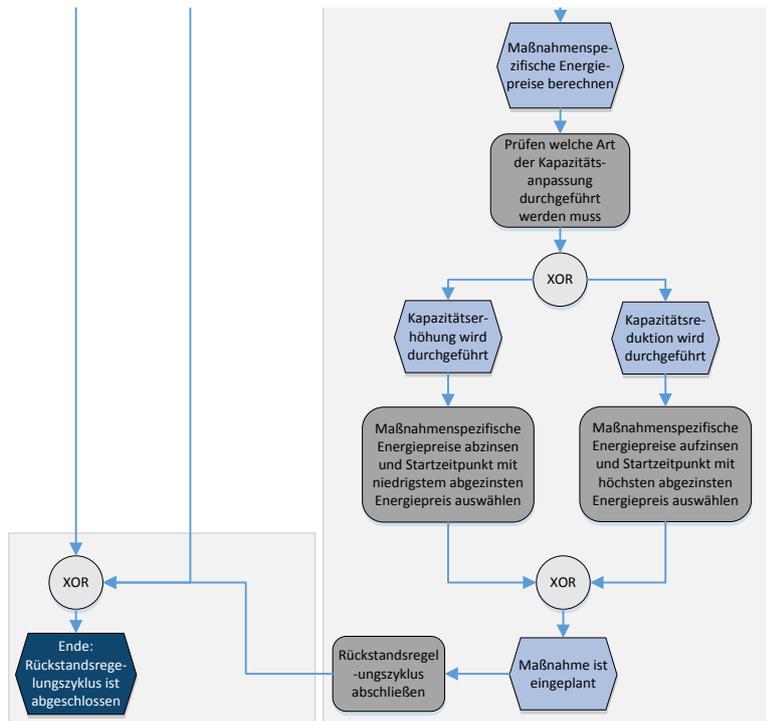


Abbildung 50: Ereignisgesteuerte Prozesskette der energiekostenorientierten Rückstandsregelung (II/II)

11. Literaturverzeichnis

- [Art13] Artigues, C.; Lopez, P.; Hait, A. (2013): The energy scheduling problem: Industrial case-study and constraint propagation techniques. In: International Journal of Production Economics (143), S. 13–23.
- [Aum09] Aumayr, Klaus J. (2009): Erfolgreiches Produktmanagement. Tool-Box für das professionelle Produktmanagement und Produktmarketing. 2., erg. Aufl. Wiesbaden: Gabler.
- [BDE15] BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (Hg.) (2015): Erneuerbare Energien und das EEG: Zahlen, Fakten, Grafiken. Anlagen, installierte Leistung, Stromerzeugung, EEG-Auszahlungen, Marktintegration der Erneuerbaren Energien und regionale Verteilung der EEG-induzierten Zahlungsströme. Berlin. Online verfügbar unter [https://www.bdew.de/internet.nsf/id/B2F6D4CCC2CB5324C1257C8A003AB831/\\$file/Energie-Info_Erneuerbare%20Energien%20und%20das%20EEG%20\(2015\)_11.05.2015_final.pdf](https://www.bdew.de/internet.nsf/id/B2F6D4CCC2CB5324C1257C8A003AB831/$file/Energie-Info_Erneuerbare%20Energien%20und%20das%20EEG%20(2015)_11.05.2015_final.pdf).
- [BDE16] BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (Hg.) (2016): BDEW-Strompreisanalyse Januar 2016. Haushalte und Industrie. Berlin. Online verfügbar unter [https://www.bdew.de/internet.nsf/res/70842D8DCAE68ED3C1257F45003858BC/\\$file/160119_BDEW_Strompreisanalyse_Januar2016.pdf](https://www.bdew.de/internet.nsf/res/70842D8DCAE68ED3C1257F45003858BC/$file/160119_BDEW_Strompreisanalyse_Januar2016.pdf).
- [Bor05] Borenstein, S. (2005): The Long-Run Efficiency of Real-Time Electricity Pricing. In: The Energy Journal 26 (3). Online verfügbar unter <http://faculty.haas.berkeley.edu/borenste/download/EnJo05RTPsim.pdf>.
- [Bruz12] Bruzzone, A.; Anghinolfi, D.; Paolucci, M.; Tonelli, F. (2012): Energy-aware scheduling for improving manufacturing process sustainability: A mathematical model for flexible flow shops. In: CIRP Annals – Manufacturing Technology (61), S. 459–462.
- [DIH12] DIHK - Deutscher Industrie- und Handelskammertag (Hg.) (2012): Faktenpapier Strompreise in Deutschland. Bestandteile, Entwicklungen, Strategien. Berlin. Online verfügbar unter http://www.ihk-arnsberg.de/upload/faktenpapier_Strompreise_1_12341.pdf.
- [ECO15] ECOFYS, Fraunhofer ISI (Hg.) (2015): Stromkosten der energieintensiven Industrie. Ein internationaler Vergleich. Berlin. Online verfügbar unter http://www.isi.fraunhofer.de/isi-wAssets/docs/x/de/projekte/Strompreiswirkung_330639/Industriestrompreise_Abschlussbericht.pdf.
- [EEX14] EEX - European Energy Exchange (Hg.) (2014): Strompreise Spotmarkt. Online verfügbar unter <http://www.epexspot.com>.
- [EnE12] Europäische Parlament und der Rat der europäischen Union (2012):

- Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. Oktober 2012 zur Energieeffizienz, zur Änderung der Richtlinien 2009/125/EG und 2010/30/EU und zur Aufhebung der Richtlinien 2004/8/EG und 2006/32/EG (EnEff-RL). Richtlinie 2012/27/EU. Fundstelle: ABI. EU Nr. L 315.
- [EnW14] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (21.07.2014): Gesetz über die Elektrizitäts- und Gasversorgung (Energiewirtschaftsgesetz). EnWG. In: BGBl. I, S. 1066–1132.
- [Far09] Faruqui, Ahmad; Hledik, Ryan; Tsoukalis, John (2009): The Power of Dynamic Pricing. In: The Electricity Journal 22 (3), S. 42–56. DOI: 10.1016/j.tej.2009.02.011.
- [Fre07] Frenzel, S. (2007): Stromhandel und staatliche Ordnungspolitik. 186, 1. Auflage. Berlin: Duncker & Humblot GmbH (Schriftenreihe der Hochschule Speyer).
- [Jah13] Jahn, A. (2013): Nachfragesteuerung im deutschen Stromsystem – die unerschlossene Ressource für die Versorgungssicherheit. Hg. v. The Regulatory Assistance Project. Berlin. Online verfügbar unter www.raponline.org/document/download/id/6658.
- [Kal12] Kals, J. (2012): Neue Anforderungen an die PPS in Folge der Energiewende. In: Productivity Management (4), S. 17–19.
- [Kon13] Konstantin, Panos (2013): Praxisbuch Energiewirtschaft. Energieumwandlung, -transport und -beschaffung im liberalisierten Markt. 3., aktual. Aufl. 2013. Berlin, Heidelberg: Imprint: Springer Vieweg (VDI-Buch).
- [Krä91] Krämer, Horst (1991): Elektrotechnik im Maschinenbau. 3., völlig überarb. Aufl. Braunschweig, Wiesbaden: Vieweg.
- [Löd08] Lödding, Hermann (2008): Verfahren der Fertigungssteuerung. Grundlagen, Beschreibung, Konfiguration. [Online-Ausg. der] 2., erw. [gedr.] Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer (VDI).
- [Mül12] Müller, E.; Schillig, R.; Stock, T. (2012): Darstellung von Energiewertströmen erlaubt umfassende Wertstromanalyse. In: VDI-Z (7/8), S. 58–61.
- [Nab09] Nabe, C.; Beyer, C.; Brodersen, N.; Schäffler, H.; Adam, D.; Heinemann, C. et al. (2009): Einführung von lastvariablen und zeitvariablen Tarifen. Gutachten im Auftrag der Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen,. Online verfügbar unter http://www.ecofys.com/files/files/ecofys_2009_einfuehrung_last-u_zeitvariabler%20tarife.pdf.
- [Pfo06] Pfohl, Hans-Christian; Arnold, Ulli (2006): Betriebswirtschaftslehre der Mittel- und Kleinbetriebe. Größenspezifische Probleme und Möglichkeiten zu ihrer Lösung. 4., völlig neu bearb. Aufl. Berlin: Schmidt (Management

und Wirtschaft Praxis, Bd. 44).

- [Pro14] Prognos AG, EWI - Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln, Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung mbH (GWS) (Hg.) (2014): Entwicklung der Energiemärkte – Energiereferenzprognose. Projekt Nr. 57/12 Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie. Basel, Köln, Osnabrück. Online verfügbar unter <http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/Publikationen/entwicklung-der-energiemaerkte-energiereferenzprognose-endbericht,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf>.
- [Rie12] Rieseberg, S.; Wörlen, C. (2012): Befreiungen der energieintensiven Industrie in Deutschland von Energieabgaben. Hg. v. Arepo Consult. Berlin. Online verfügbar unter http://www.rosalux.de/fileadmin/rls_uploads/pdfs/Themen.
- [Roo10] Roon, S. von; Gobmaier, T. (2010): Demand Response in der Industrie. Status und Potenziale in Deutschland. Hg. v. FfE - Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. Online verfügbar unter https://www.ffe.de/download/article/353/von_Roon_Gobmaier_FfE_Demand_Response.pdf.
- [Sch11] Schlesinger, M.; Wünsch, M. (2011): Steigende Strompreise für die Industrie unvermeidbar. In: Energiewirtschaftliche Tagesfragen - Zeitschrift für Energiewirtschaft, Recht, Technik und Umwelt 61 (12), S. 26–30.
- [Wie97] Wiendahl, Hans-Peter (1997): Fertigungsregelung. Logistische Beherrschung von Fertigungsabläufen auf Basis des Trichtermodells : 42 Tabellen. München [u.a.]: Hanser.

12. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Spotmarktpreis an der EEX Leipzig	9
Abbildung 2: Kategorien des Nachfragemanagements	10
Abbildung 3: Lastvariablen Monatstarif mit drei Preisstufen	11
Abbildung 4: Dreistufiger Time-Of-Use-Tarif.....	12
Abbildung 5: Critical-Peak-Price-Tarif.....	12
Abbildung 6: Zusammenhang zwischen Fertigungsauftragsmerkmalen und der mittleren elektrischen Leistung an einem Induktionsofen	13
Abbildung 7: Einflussfaktoren auf den zeitlichen Energieverbrauch einer Produktionsanlage	14
Abbildung 8: Einflussmatrix der Fertigungssteuerung	15
Abbildung 9: Erweiterung des Modells der Fertigungssteuerung um Energiekosten	16
Abbildung 10: Beispiel für die Berechnung des auftragsspezifischen Energiepreises.....	22
Abbildung 11: Exemplarische Darstellung der Rückstandsregelung	27
Abbildung 12: Exemplarische Darstellung der ECO-BC	27
Abbildung 13: Wirkungsweise des Verzinsungsfaktors bei einer Kapazitätserhöhung.....	29
Abbildung 14: Aufbau des Simulationsmodells in Plant Simulation	31
Abbildung 15: Beispiel für den Aufbau einer Sortierer-Liste mit den Informationen der in der Warteschlange wartenden Aufträge.....	32
Abbildung 16: Auswirkungen der EAnT auf die erweiterten logistischen Zielgrößen	33
Abbildung 17: Abzinsung der elektrischen Leistungsschwankung.....	33
Abbildung 18: Energiekosteneinsparung durch EAnT bei Veränderung der Leistungsschwankung	34
Abbildung 19: Energiekosteneinsparung durch EAnT bei steigendem Anteil des fixen Energieverbrauches	34
Abbildung 20: Energiekosteneinsparung durch EAnT bei Veränderung des Freigabeintervalls der Auftragsfreigabe	35
Abbildung 21: Energiekosteneinsparung durch EAnT bei Veränderung des Berechnungsintervalls des rollierenden Strompreismedians	36
Abbildung 22: Energiekosteneinsparung durch EAnT bei Veränderung der mittleren Losgröße	36
Abbildung 23: Energiekosteneinsparung durch EAnT bei Veränderung des Bestandsniveaus der Fertigung	37
Abbildung 24: Wirkungsweise der Abzinsung des realen Spot-Strompreises	37

Abbildung 25: Energiekosteneinsparung durch EAnT bei Veränderung der Strompreisschwankungen	38
Abbildung 26: Auswirkungen von Sigma auf die Termintreue und die Energiekosten.....	38
Abbildung 27: Auswirkungen von Sigma auf die Durchlaufzeit und ihre Standardabweichung	39
Abbildung 28: Auswirkungen von Sigma auf die mittlere und die mittlere positive Terminabweichung	40
Abbildung 29: Energiekosteneinsparung durch ECO-S bei Veränderung der Leistungsschwankung	40
Abbildung 30: Energiekosteneinsparung durch ECO-S bei steigendem Anteil des fixen Energieverbrauches	41
Abbildung 31: Energiekosteneinsparung durch ECO-S bei Veränderung des Berechnungsintervalls des rollierenden Strompreismedians	42
Abbildung 32: Energiekosteneinsparung durch ECO-S bei Veränderung der mittleren Losgröße	42
Abbildung 33: Energiekosteneinsparung durch ECO-S bei Veränderung des Bestandsniveaus der Fertigung	43
Abbildung 34: Energiekosteneinsparung durch EAnT bei Veränderung der Strompreisschwankungen	43
Abbildung 35: Auswirkungen der ECO-BC auf die erweiterten logistischen Zielgrößen.....	44
Abbildung 36: Energiekosteneinsparung durch ECO-BC bei Veränderung des Verzinsungsfaktors	45
Abbildung 37: Energiekosteneinsparung durch ECO-BC bei Veränderung des Entscheidungshorizontes.....	45
Abbildung 38: Energiekosteneinsparung durch ECO-BC bei Veränderung des Auslöserückstandes.....	46
Abbildung 39: Energiekosteneinsparung durch ECO-BC bei Veränderung des Melderückstandes.....	47
Abbildung 40: Energiekosteneinsparung durch ECO-BC bei Veränderung der Strompreisschwankungen	47
Abbildung 41: Wirkmodell zur Darstellung des Einflusses der Aufgaben der Fertigungssteuerung auf die Energiekosten	59
Abbildung 42: Wirkmodell zur Darstellung des Einflusses der Auftragsfreigabe nach Termin auf die Energiekosten	60
Abbildung 43: Wirkmodell zur Darstellung des Einflusses der geringsten Restschlupf-Regel auf die Energiekosten.....	61
Abbildung 44: Wirkmodell zur Darstellung des Einflusses der Rückstandsregelung auf die Energiekosten	62

Abbildung 45: Ereignisgesteuerte Prozesskette der energiekostenorientierten Auftragsfreigabe nach Termin (I/II)	63
Abbildung 46: Ereignisgesteuerte Prozesskette der energiekostenorientierten Auftragsfreigabe nach Termin (II/II)	64
Abbildung 47: Ereignisgesteuerte Prozesskette der energiekostenorientierten Reihenfolgebildung (I/II).....	65
Abbildung 48: Ereignisgesteuerte Prozesskette der energiekostenorientierten Reihenfolgebildung (II/II).....	66
Abbildung 49: Ereignisgesteuerte Prozesskette der energiekostenorientierten Rückstandsregelung (I/II).....	67
Abbildung 50: Ereignisgesteuerte Prozesskette der energiekostenorientierten Rückstandsregelung (II/II).....	68

13. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Mitglieder des projektbegleitenden Ausschusses	52
Tabelle 2: Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft (spezifische durchgeführte und geplante Transfermaßnahmen)	52