
Leitfaden Energiekostenorientierte Fertigungssteuerungsverfahren

Der vorliegende Leitfaden dient zur einfachen Einführung und Anwendung der entwickelten energiekostenorientierten Fertigungssteuerungsverfahren. Durch die Anwendung der erweiterten Fertigungssteuerungsverfahren lassen sich Energiekosten senken, ohne teilweise eine deutliche Verschlechterung logistischer 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.

Energiekostenorientierte Auftragsfreigabe nach Termin

Wie die weit verbreitete Auftragsfreigabe nach Termin gibt die energiekostenorientierte Auftragsfreigabe nach Termin die Aufträge mit erreichtem Plan-Starttermin frei. Dabei werden die Aufträge in einer Reihenfolge freigegeben, die zur Senkung der Energiekosten am ersten Arbeitssystem führt.

Anwendungsvoraussetzungen

Damit die energiekostenorientierte Auftragsfreigabe nach Termin in der Lage ist, Energiekosten zu senken, müssen einige Voraussetzungen erfüllt sein.

Zunächst muss die Auftragsfreigabe so stattfinden, dass **mindestens zwei Aufträge mit erreichtem Plan-Starttermin** vorliegen. Weiterhin müssen **schwankende auftrags- und arbeitssystemspezifische elektrische Leistungen am ersten Arbeitssystem der jeweiligen Aufträge** bestehen. **Strompreisschwankungen** sind eine Grundvoraussetzung ebenso wie **Strompreisprognosen**. 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 daher bekannt sein, um diesen geplanten Bearbeitungsbeginn zu berechnen. Weiterhin müssen die **Bearbeitungszeiten** und die **mittleren elektrischen Leistungen für die Bearbeitung** aller Aufträge in der Freigabe vorliegen. Damit die Aufträge am ersten Arbeitssystem in der Reihenfolge bearbeitet werden, in der sie freigegeben wurden, dürfen an dem Arbeitssystem keine Reihenfolgevertauschungen vorgenommen werden. Dies wird durch das reihenfolgeneutrale **Sortierkriterium FIFO** umgesetzt.

Vorgehen zur energiekostenorientierten Auftragsfreigabe nach Termin

Das Vorgehen während eines Freigabezyklus ist als ereignisgesteuerte Prozesskette im Anhang dieses Leitfadens beigefügt. Die Formeln zur Berechnung der Priorität werden im folgenden Abschnitt vorgestellt und erläutert.

Der Freigabezyklus findet in einem festgelegten Freigabeintervall statt.

1. Schritt

1.1 Aus der *Liste aller erzeugten Aufträge (Anmerkung *1)* wird ein beliebiger Auftrag ausgewählt.

1.2 Der ausgewählte Auftrag wird auf seine Dringlichkeit geprüft. Ein Auftrag ist dringlich, wenn der Plan-Starttermin erreicht ist.

- Ist der Auftrag dringlich, wird dieser in die *Liste dringlicher Aufträge* verschoben.
- Ist der Auftrag nicht dringlich, wird dieser in die *Liste nicht dringlicher Aufträge* verschoben.

1.3 Es wird geprüft, ob sich in der *Liste aller Aufträge* noch ein Auftrag befindet.

- Liegt mindestens ein weiterer Auftrag vor, wird dieser ausgewählt und mit Schritt 1.2 fortgefahren. Liegen mehrere Aufträge vor, so wird ein beliebiger Auftrag ausgewählt.
- Liegt kein weiterer Auftrag vor, so wird mit Schritt 2 fortgefahren.

2. Schritt

2.1 Aus der *Liste dringlicher Auftrag* wird ein beliebiger Auftrag ausgewählt.

2.2 Für den ausgewählten Auftrag wird nach der Formel (1) die Priorität berechnet.

2.3 Es wird geprüft, ob sich in der *Liste dringlicher Aufträge* noch ein Auftrag befindet.

- Liegt mindestens ein weiterer Auftrag vor, wird dieser ausgewählt und mit Schritt 2.2 fortgefahren. Liegen mehrere Aufträge vor, so wird ein beliebiger Auftrag ausgewählt.
- Liegt kein weiterer Auftrag vor, so wird mit Schritt 3 fortgefahren.

3. Schritt

3.1 Es wird der Auftrag mit der geringsten Prioritätszahl freigegeben und aus der *Liste dringlicher Aufträge* entfernt.

3.2 Es wird geprüft, ob noch ein Auftrag in der *Liste dringlicher Aufträge* vorhanden ist.

- Befindet sich mindestens ein Auftrag in der Liste, wird mit Schritt 2 fortgefahren.
- Befindet sich kein Auftrag in der Liste, wird mit Schritt 4 fortgefahren.

4. Schritt

Der Freigabezyklus ist abgeschlossen, da kein weiterer Auftrag mehr freigegeben werden kann. Sobald der Zeitpunkt des nächsten Freigabezyklus erreicht ist, wird mit Schritt 1 begonnen.

Anmerkung *1: Die Aufträge aus der Liste nicht dringlicher Kundenaufträge und die Aufträge aus der Liste dringlicher, zurückgestellter Aufträge aus der vorangegangenen Periode werden in die Liste aller Kundenaufträge verschoben. Somit werden in dieser Periode alle bisher nicht freigegebenen und alle neu dazu gekommenen Fertigungsaufträge betrachtet.

Gleichungen zur Berechnung der Priorität

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 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 $\bar{k}_{n,m}$ (auftragspezifischer 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 im Betrachtungszeitraum 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]
$\bar{k}_{n,m}$	Auftragsspezifischer 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 auftragsspezifische 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 auftragsspezifischen 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 auftragsspezifische Energiepreis eines Auftrages 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 Auftrages n an Arbeitssystem m [h]
$\bar{k}_{n,m}$	Auftragsspezifischer Energiepreis - durchschnittliche Strompreis für den Auftrag n an Arbeitssystem m [ct/kWh]
$K(t)$	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]

Energiekostenorientierte Reihenfolgebildung

Die energiekostenorientierte Reihenfolgebildung orientiert sich an der weit verbreiteten Reihenfolgeregel geringster Restschlupf und wird nach jeder Fertigstellung eines Auftrages am Arbeitssystem m angewendet. Durch die Anwendung der Reihenfolgeregel können sowohl die Energiekosten reduziert, als auch eine geringe Terminabweichung realisiert werden.

Anwendungsvoraussetzungen

Die Anwendungsvoraussetzungen der energiekostenorientierten Reihenfolgebildung entsprechen nahezu denen der energiekostenorientierte Auftragsfreigabe nach Termin. Dafür müssen **schwankende auftrags- und arbeitssystemspezifische elektrische Leistungen** 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 mittleren elektrischen Leistungen 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.

Vorgehen zur energiekostenorientierten Reihenfolgebildung

Der Prioritätswert muss nach jeder Fertigstellung eines Auftrages erneut berechnet werden, damit der Prioritätswert der nachrückenden Aufträge auf Grundlage des aktuellen Strompreises bestimmt wird.

Das Vorgehen während einer Reihenfolgebildung ist als ereignisgesteuerte Prozesskette im Anhang dieses Leitfadens beigefügt. Die Formeln zur Berechnung der Priorität werden im folgenden Abschnitt vorgestellt und erläutert.

Die Reihenfolgebildung startet, wenn der vorherige Auftrag am betrachteten Arbeitssystem abgeschlossen ist.

1. Schritt

1.1 Aus der *Liste aller Aufträge (Anmerkung *1)* in der Warteschlange wird ein beliebiger Auftrag ausgewählt.

1.2 Für den ausgewählten Auftrag wird der Schlupf nach Gleichung (5) berechnet. Daraufhin wird der Auftrag in die *Liste geprüfter Aufträge* verschoben.

1.3 Es wird geprüft, ob sich in der *Liste aller Aufträge* in der Warteschlange noch ein Auftrag befindet.

- Liegt mindestens ein weiterer Auftrag vor, wird dieser ausgewählt und mit Schritt 1.2 fortgeföhren. Liegen mehrere Aufträge vor, so wird ein beliebiger Auftrag ausgewählt.
- Liegt kein weiterer Auftrag vor, so wird mit Schritt 2 fortgeföhren.

2. Schritt

2.1 Aus der *Liste geprüfter Aufträge* wird ein beliebiger Auftrag ausgewählt.

2.2 Für den betrachteten Auftrag werden die auftragspezifischen Energiepreise nach Gleichung (8) berechnet. Zudem wird der Auftrag in die *Liste energiepreisgeprüfter Aufträge* verschoben.

2.3 Es wird geprüft, ob sich in der *Liste geprüfter Aufträge* noch ein Auftrag befindet.

- Liegt mindestens ein weiterer Auftrag vor, wird dieser ausgewählt und mit Schritt 2.2 fortgefahren.
- Liegt kein weiterer Auftrag vor, so wird mit Schritt 3 fortgefahren.

3. Schritt

3.1 Aus der *Liste energiepreisgeprüfter Aufträge* wird ein beliebiger Auftrag ausgewählt.

3.2 Für den betrachteten Auftrag wird der Prioritätswert nach Gleichung (6) berechnet und der Auftrag in die *Prioritätenliste* verschoben.

3.3 Es wird geprüft, ob sich in der *Liste energiepreisgeprüfter Aufträge* noch ein Auftrag befindet.

- Liegt mindestens ein weiterer Auftrag vor, wird dieser ausgewählt und mit Schritt 3.2 fortgefahren.
- Liegt kein weiterer Auftrag vor, so wird mit Schritt 4 fortgefahren.

4. Schritt

4.1 Es wird dem Auftrag mit dem geringsten Prioritätswert die höchste Priorität zugeteilt. Er wird als nächstes bearbeitet. Gleichzeitig wird er aus der *Prioritätenliste* entfernt. Damit ist die Reihenfolgebildung abgeschlossen.

Anmerkung *1: Die Liste aller Aufträge in der Warteschlange entspricht den physisch vorliegenden Aufträgen am Arbeitssystem. Aufträge aus der Liste geprüfter und energiepreisgeprüfter Aufträge werden beim nächsten Zyklus der Reihenfolgebildung in die Liste aller Aufträge in der Warteschlange verschoben.

Gleichungen zur Berechnung der Priorität

$Schlupf_n$ [h] stellt 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:

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

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 der energiekostenorientierten Reihenfolgebildung 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 energiekostenorientierten Auftragsfreigabe nach Termin, 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 ζ . 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):

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

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

$\bar{k}_{n,m}$ 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 auftragsspezifische Energiepreis eines Auftrages nach Gleichung (8):

$$\bar{k}_{n,m} = \frac{\int_{t_{start,n,m}}^{t_{ende,n,m}} K(t) dt}{BZ_{n,m}} \quad (8)$$

mit $n \in N$	Auftrag dessen Plan-Starttermin erreicht ist [-]
$m \in M$	Arbeitssystem des ersten Arbeitsvorganges [-]
$BZ_{n,m}$	Bearbeitungszeit des Auftrages 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 die eigene Rüstzeit. Das Bearbeitungsende eines Auftrages ergibt sich aus der Summe des Bearbeitungsbeginnes und der Bearbeitungszeit des Auftrages:

$$t_{start,n,m} = TP_0 + ZR_{n,m} \quad (9)$$

$$t_{ende,n,m} = t_{start,n,m} + BZ_{n,m} \quad (10)$$

mit TP_0 Planungszeitpunkt [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:

$$Schlupf_n = -(Schlupf_{max,m}) \text{ für } Schlupf_n \leq -Schlupf_{max,m} \quad (11)$$

Energiekostenorientierte Rückstandsregelung

Die energiekostenorientierte Rückstandsregelung (ECO-BC) erweitert die klassische Rückstandsregelung (BC) um einen zeitlichen Freiheitsgrad. Die gewählten Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung werden nun nicht direkt nach einer 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 der klassischen Rückstandsregelung durch einen Auslöse- und einen Melderückstand ersetzt. Erreicht der Rückstand, also die kumulierte Differenz des Ist-Abgangs zum Plan-Abgang, den oberen Melderückstand wird eine Maßnahme 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 1).

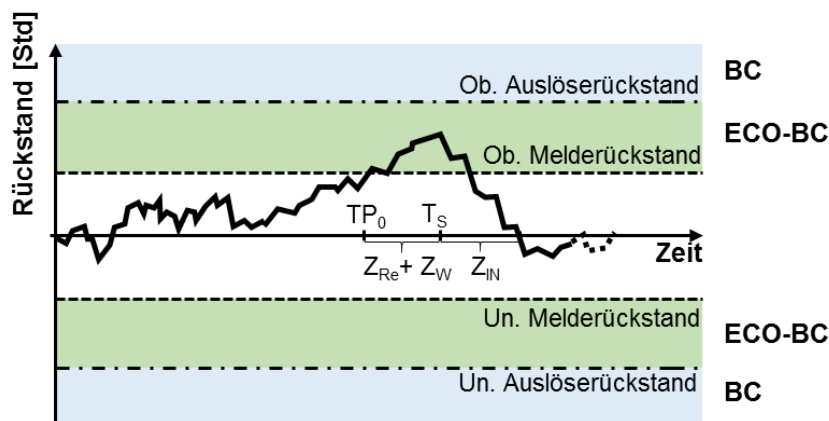


Abbildung 1: Exemplarische Darstellung der ECO-BC

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** (in wie vielen Tagen muss die Maßnahme spätestens durchgeführt sein?) und der **Verzinsungsfaktor** (wie stark ist die Präferenz einer frühen Durchführung der Maßnahme zur Kapazitätsanpassung?) festgelegt werden. Ein **langer Entscheidungshorizont** und ein **kleiner Verzinsungsfaktor** eröffnen für das Verfahren das höchste Potential zur Energiekosteneinsparung.

Vorgehen zur energiekostenorientierten Rückstandsregelung

Das Vorgehen während eines Rückstandsregelungszyklus ist als ereignisgesteuerte Prozesskette im Anhang dieses Leitfadens beigefügt. Die Formeln zur Bestimmung der Startzeitpunkte einer Maßnahme zur Kapazitätsanpassung werden im folgenden Abschnitt vorgestellt und erläutert.

Der Rückstand wird zu den vorher definierten Zeitpunkten gemessen.

1. Schritt

1.1 Der Rückstand wird berechnet.

1.2 Es wird geprüft, ob der Rückstand die Meldegrenze erreicht ist.

- Ist die Meldegrenze nicht erreicht wird mit Schritt 4 fortgefahren.
- Ist die Meldegrenze erreicht, so wird mit Schritt 2 fortgefahren.

2. Schritt

2.1 Es wird geprüft, ob die Auslösegrenze erreicht ist.

- Ist die Auslösegrenze nicht erreicht, so wird eine Maßnahme zur Kapazitätsanpassung ausgewählt und mit Schritt 3 fortgefahren
- Ist die Auslösegrenze erreicht, so wird eine Maßnahme zur Kapazitätsanpassung ausgewählt, zum frühestmöglichen Zeitpunkt gestartet und mit Schritt 4 fortgefahren.

3. Schritt

3.1 Es werden alle möglichen Startzeitpunkte der Maßnahme innerhalb des Entscheidungshorizontes ermittelt.

3.2 Die maßnahmenspezifischen Energiepreise werden für alle Startzeitpunkte berechnet.

3.3 Es wird geprüft, welche Art der Kapazitätsanpassung durchgeführt werden muss.

- Muss eine Kapazitätserhöhung durchgeführt werden, werden die maßnahmenspezifischen Energiepreise anhand des Verzinsungsfaktors abgezinst und der Startzeitpunkt mit dem niedrigsten abgezinsten Energiepreis ausgewählt.
- Muss eine Kapazitätsreduktion durchgeführt werden, werden die maßnahmenspezifischen Energiepreise anhand des Verzinsungsfaktors aufgezinst und der Startzeitpunkt mit dem höchsten abgezinsten Energiepreis ausgewählt.

3.4 Die Maßnahme zur Kapazitätsanpassung ist für den gewählten Startzeitpunkt einzuplanen. Es wird mit Schritt 4 fortgefahren.

4. Schritt

4.1 Der Zyklus zur Rückstandsregelung ist abgeschlossen.

Gleichungen zur Berechnung der maßnahmenspezifischen Energiepreise

Wird nun ein Rückstand gemessen, der zwischen dem Auslöse- und Melderückstand liegt, ist in Abhängigkeit des Melderückstandes eine Maßnahme (beispielsweise vier 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:

$$\bar{k}_{IN,T_{IN}} = \frac{\int_{T_{IN}}^{T_{IN}+Z_{IN}} K(t) dt}{Z_{IN}} \quad (12)$$

- 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:

$$VZ_d = VF_0 + \frac{VF_0}{E-1}(1-d) \quad (13)$$

- 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 aufgezinst 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 aufgezinsten Energiepreis ausgewählt:

$$\bar{k}'_{IN,T_{IN}} = \bar{k}_{IN,T_{IN}} * (1 - VZ_{d(T_{IN})}) \quad \text{bei einer Kapazitätserhöhung} \quad (14)$$

$$\bar{k}'_{IN,T_{IN}} = \bar{k}_{IN,T_{IN}} * (1 + VZ_{d(T_{IN})}) \quad \text{bei einer Kapazitätsreduktion} \quad (15)$$

- 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 2a), 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 abgezinste Strompreis vorliegt. Liegt jedoch ein schwankender Strompreis (Abbildung 2b) 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 abgezinste Energiepreis an Tag 2 vor, wodurch der Startzeitpunkt der Maßnahme an diesem Tag vorhergesehen wird.

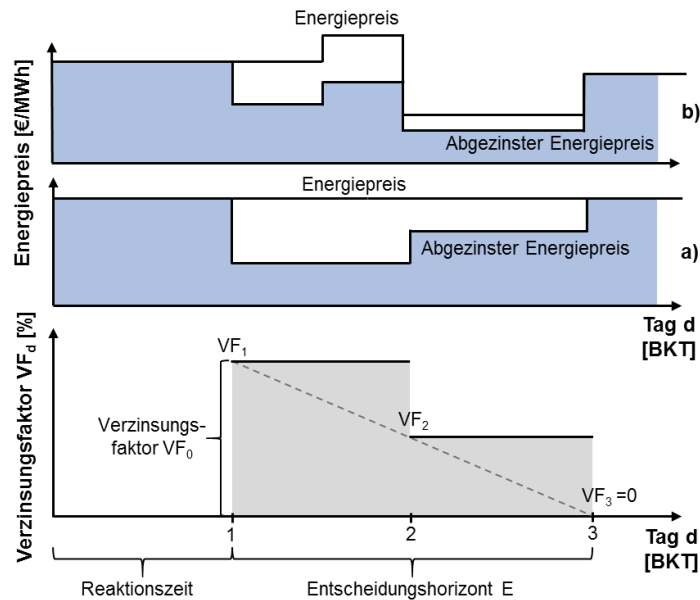


Abbildung 2: Wirkungsweise des Verzinsungsfaktors bei einer Kapazitätserhöhung

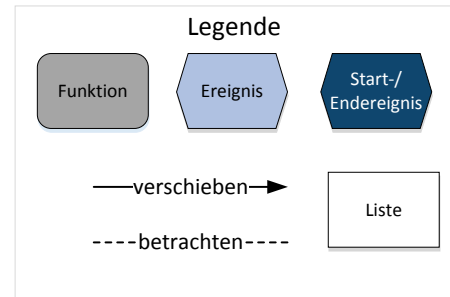
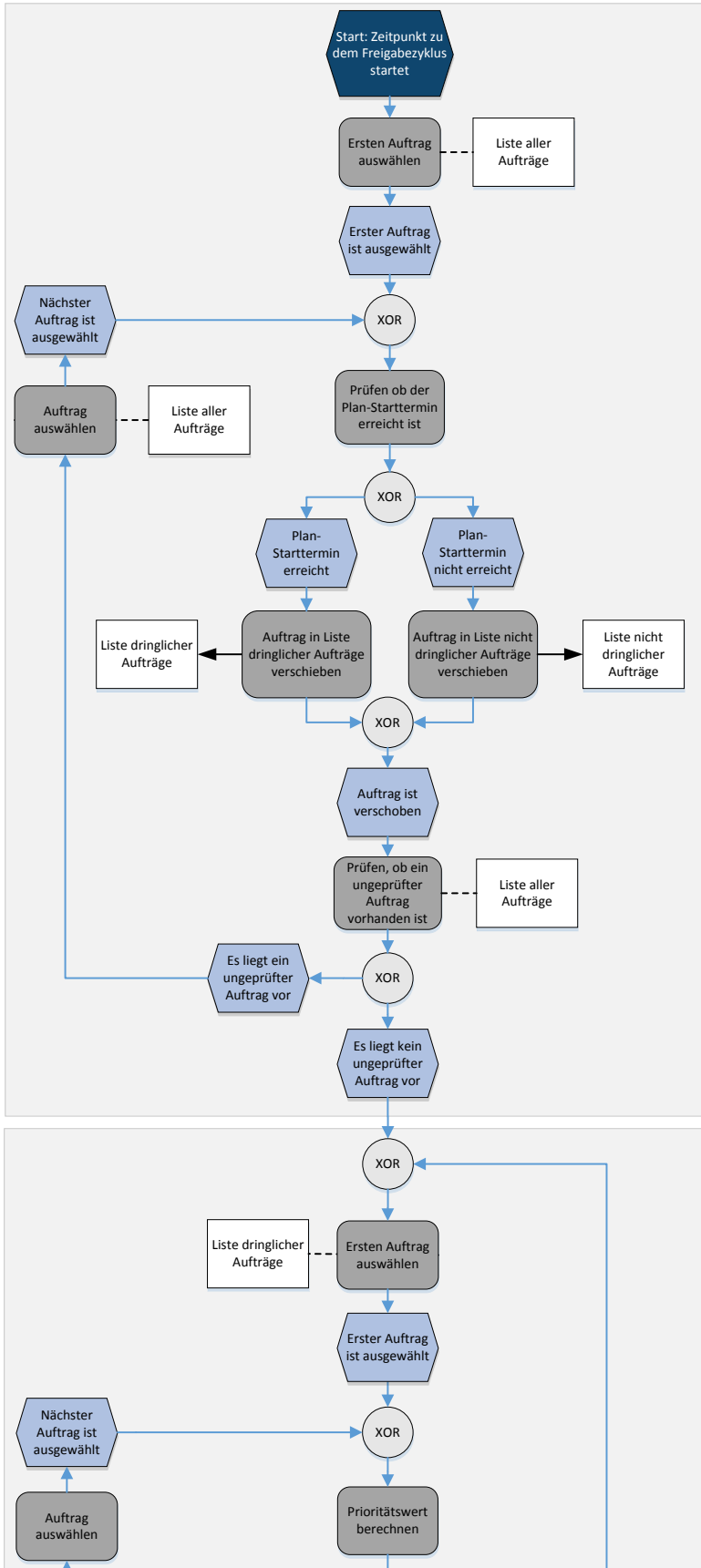
Kontaktdaten

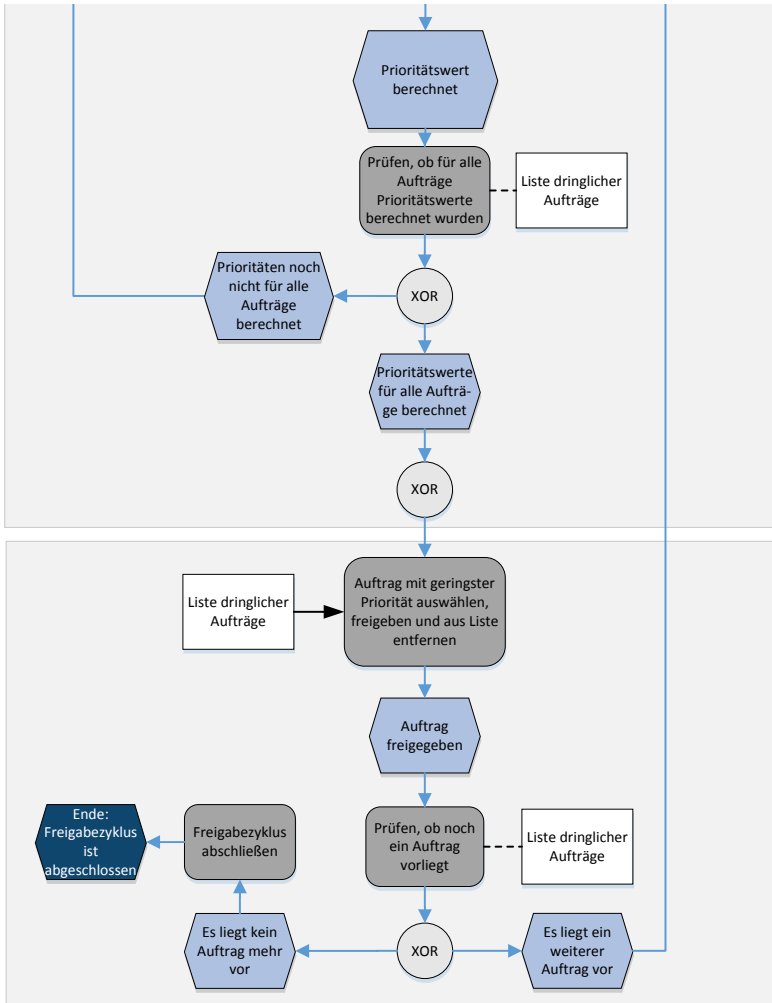
IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH
 M. Sc. Stefan Willeke
 Hollerithallee 6 | 30419 Hannover

+49 (0)511 27976-442 | @ willeke@iph-hannover.de | www.EnKoFer.de

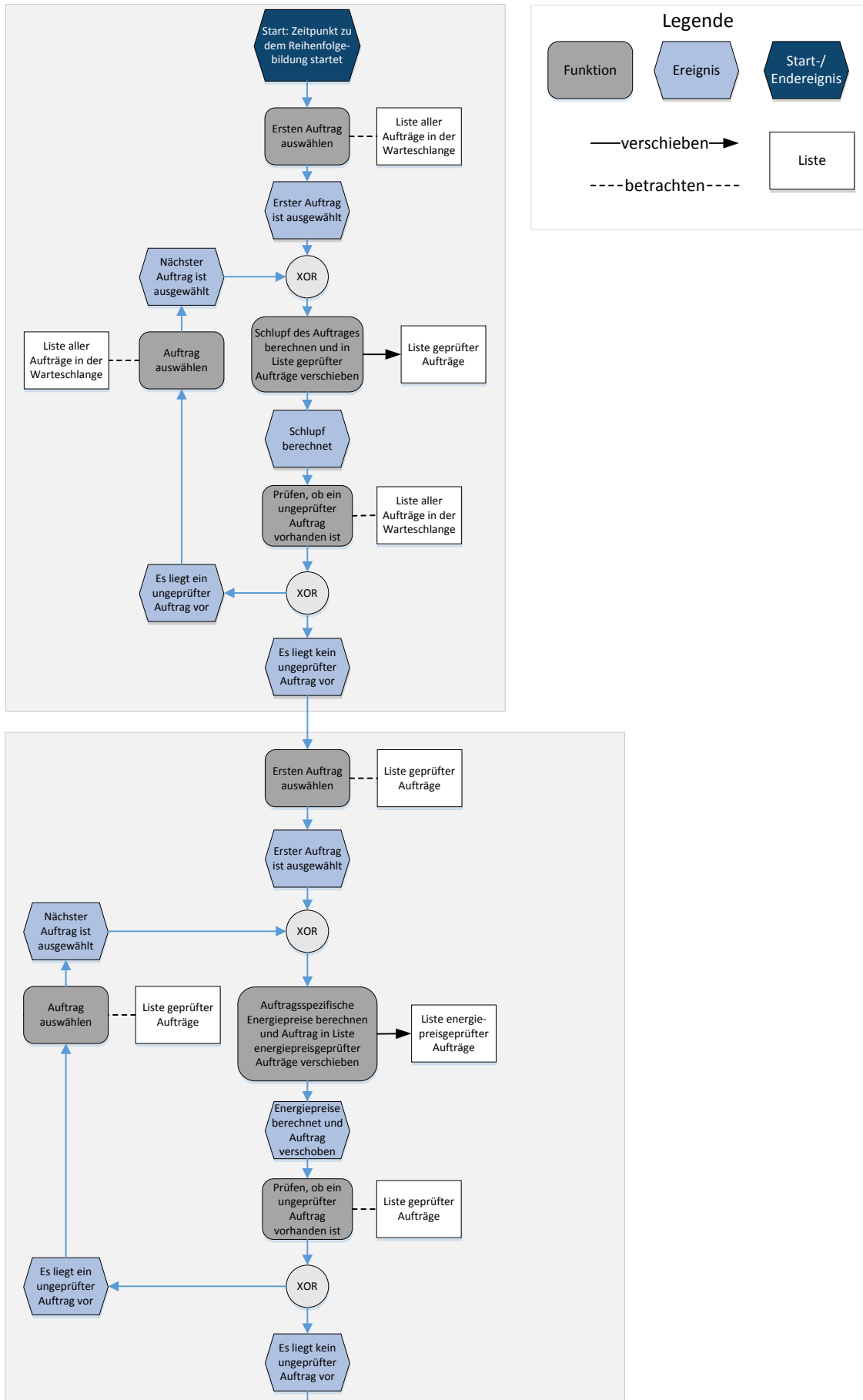
Anhang - Ereignisgesteuerte Prozessketten der Fertigungssteuerungsverfahren

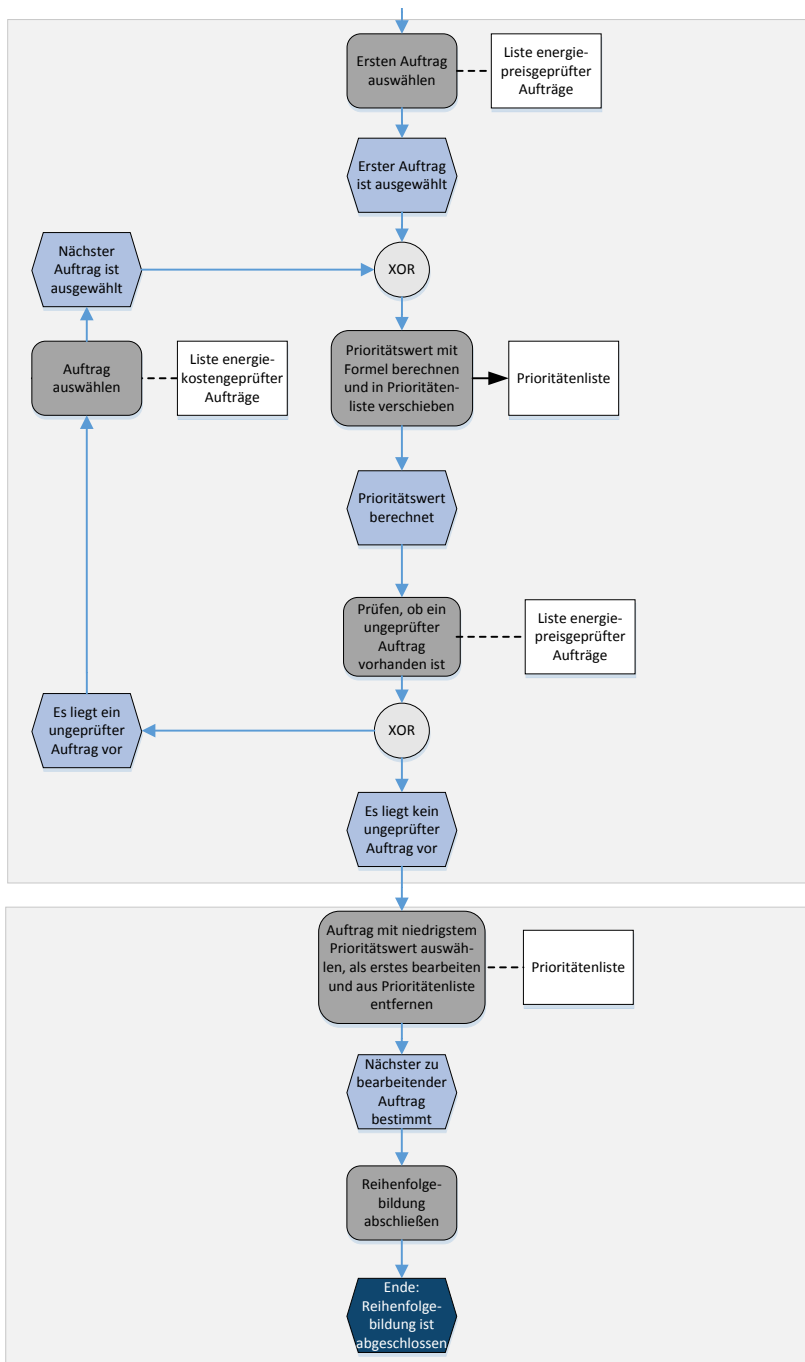
Energiekostenorientierte Auftragsfreigabe nach Termin





Energiekostenorientierte Reihenfolgebildung





Energiekostenorientierte Rückstandsregelung

