

# **Potentiale in der Reduzierung des Gesamtenergieverbrauchs einer Werkstattfertigung in der Maschinenbelegungsplanung**

## ***Potential of Reducing the Total Energy Consumption by Scheduling a Jobshop Production System***

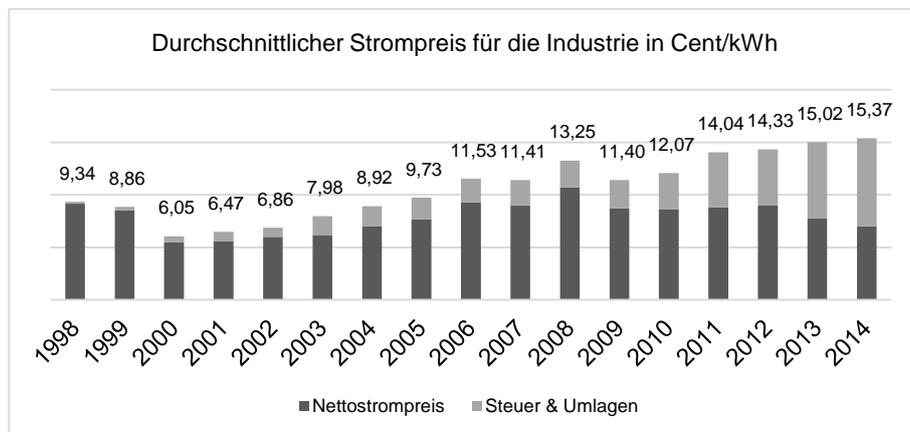
Maximilian Selmair, Frank Herrmann, OTH Regensburg, Regensburg (Germany),  
maximilian.selmair@mailbox.tu-dresden.de, frank.herrmann@oth-regensburg.de

Thorsten Claus, Enrico Teich, TU Dresden, Dresden (Germany),  
thorsten.claus@tu-dresden.de, enrico.teich@tu-dresden.de

**Abstract:** This research paper has evaluated the potential of reducing energy consumption by scheduling jobshop production systems with machines using standby modes in free times. The initial introduction of the planning issue is followed by a description of the approach to assess the available potential. Subsequently, the research procedure by means of simulation, a detailed discussion of the results and a perspective on future research is given. Moreover, the notion that scheduling influences the energy consumption in jobshop production systems is supported. The presented simulation research also documents that there is no direct correlation between energy consumption and total lead time, although this was presumed usually. Finally, this paper provides a forecast for a possible optimisation model as well as an exemplary model with an energy-optimised schedule plan.

## **1 Einführung**

Produktionssysteme, die sich aus Werkzeugmaschinen zur Zerspanung und Umformung konstituieren, wurden in der Vergangenheit bei Untersuchungen zu Energieeinsparungen in der Industrie nicht berücksichtigt (Neugebauer 2008). Trotz des immensen Energiebedarfs solcher Systeme, ist deren Energieverbrauch erst seit einigen Jahren zum Augenmerk von sowohl Maschinennutzern als auch -herstellern geworden (ebenda). Grund hierfür sind sicherlich die steigenden Energiepreise der vergangenen Jahre (Wagner 2012), aber auch ein gestiegenes Bewusstsein vieler Unternehmen für das Thema Nachhaltigkeit und der damit verbundenen Intention der Ressourcenschonung. Abbildung 1 zeigt die Strompreisentwicklung für die Industrie seit 1998.



**Abbildung 1:** Entwicklung der Energiepreise für die Industrie in Deutschland von 1998 bis 2014 (Bauernhansl et. al 2013, BDEW 2014)

Anhand des Werkzeugmaschinenbestandes in Deutschland und der im Rahmen einer Untersuchung der Fraunhofer Gesellschaft ermittelten Jahresenergieverbräuche dieser Maschinen lässt sich abschätzen, dass deren Anteil am gesamten industriellen Energiebedarf nicht zu vernachlässigen ist. Die zuletzt ermittelte Anzahl an Werkzeugmaschinen in der deutschen Industrie wurde 1995 vom Verein Deutscher Werkzeugmaschinenfabriken e.V. mit 1,04 Millionen Einheiten festgestellt (Neugebauer 2008). Ein deutlicher Großteil von 83 Prozent, 863.000 Stück, entfiel dabei auf spanende Maschinen. Die im Rahmen einer Untersuchung der Fraunhofer Gesellschaft ermittelten Jahresenergieverbräuche solcher Maschinen liegen zwischen 5.000 kWh und 150.000 kWh (ebenda). Obwohl aufgrund der hohen Varianz des Energieverbrauchs der einzelnen Maschinen eine exakte Hochrechnung nicht möglich ist, kann dennoch festgestellt werden, dass spanende Maschinen einen beträchtlichen Anteil am gesamten industriellen Energiebedarf haben.

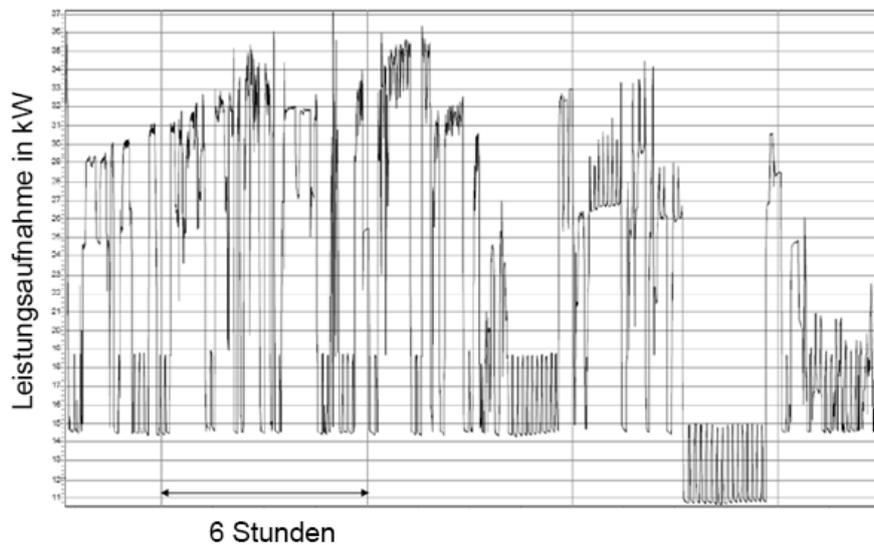
Dass dies wenigstens in einigen speziellen Industriebereichen so ist, verdeutlicht das folgende Beispiel eines Motorenwerkes eines deutschen Automobilherstellers, dessen vorwiegend spanende Produktion 66 Prozent des Gesamtenergiebedarfs des Werkes ausmacht (Tab. 1).

In Abbildung 2 ist die tatsächliche Leistungsaufnahme einer Senkrecht-Drehmaschine für die Bearbeitung von bis zu 70 Tonnen schweren Komponenten für Dampfturbinen mit einer Anschlussleistung von 150 kW dargestellt. Gut zu erkennen ist die hohe Grundlast mit einem Leistungsabwurf von 11 kW bis 15 kW über etwa drei Stunden.

Untersuchungen der Technischen Universität Chemnitz haben ergeben, dass die Grundleistung einen beträchtlichen Teil des Gesamtenergiebedarfs spanender Werkzeugmaschinen einnimmt. Es wird geschätzt, dass bis zu 30 Prozent des Gesamtenergiebedarfs auf den Energieverbrauch im Standby-Betrieb entfällt.

**Tabelle 1:** Verteilung des Elektroenergieverbrauchs in einem Motorenwerk (ebenda)

Bereich	Anteil in %
Produktion	66
Druckluft	11
Kälteanlagen	8
Emulsionsanlagen	7
Beleuchtung	4
Kühlturm	2
Heizhaus	1
Ölaufbereitung	1
Gesamt	100



**Abbildung 2:** Leistungsaufnahme einer Senkrecht-Drehmaschine (Neugebauer 2008)

Einen detaillierten Einblick gibt hierzu eine Studie der RAVEL-Dokumentationen (Neugebauer 2008). Untersucht wurde die Verteilung der Betriebszeiten spanender Werkzeugmaschinen. So wird in der Großserienproduktion lediglich in 38 Prozent der Betriebszeit tatsächlich Span abgehoben. Der übrige Teil fällt auf Umrüstvorgänge und Wartezeiten. Noch kleiner fällt der Anteil bei der Produktion von Kleinserien aus. Hier sind es nur 15 Prozent (Abb. 3).

**Table 2:** Zeitliche Auslastung von Werkzeugmaschinen in der Klein- und Großserie

	Großserie	Kleinserie
Spanabhebung	38 %	15 %
Wartezeit	36 %	55 %
Werkzeugwechsel, Einstellungen	26 %	30 %

Für die Produktionsplanung ergeben sich unmittelbar Handlungsfelder im Bereich der Ressourcenbelegungsplanung. Auf den ersten Blick erscheinen kurze Leerzeiten bzw. eine hohe Maschinenauslastung zielführend zu sein. Damit ließe sich der Energieverbrauch im Standby-Betrieb reduzieren. Möglich sind aber auch lange Leerzeiten, die eine vollständige Abschaltung von Maschinen gestatten. Für diese Option müsste das rechtzeitige sichere Hochfahren und damit die reibungslose Wiederaufnahme der Fertigung durch die Planung gewährleistet werden.

Das zweite Handlungsfeld, ebenfalls in der Produktionsplanung angesiedelt, liegt im Bereich der Losgrößenplanung. Aus größeren Losen und einem damit kleineren Produktmix je Planungsperiode ergeben sich unmittelbar weniger Rüstvorgänge und damit kürzere Wartezeiten, in denen die Maschinen mit Grundlast fahren.

## 2 Untersuchungsgegenstand

Die Maschinenbelegungsplanung (auch Feinplanung, Ablaufplanung oder Reihenfolgeplanung) legt fest, wann und in welcher Reihenfolge Aufträge an zur Verfügung stehenden Ressourcen bearbeitet werden – stets unter der Einhaltung bestimmter Restriktionen. Diese können beispielsweise vorgegebene Start- und Endtermine oder auch Rüst- und Betriebszustände der Maschinen sein.

Zur Lösung solcher Probleme wurden zahlreiche Entscheidungsmodelle mit unterschiedlichen Annahmen und Zielen entwickelt. Derartige Modelle werden in der Praxis dazu genutzt, vorhandene Ressourcen unter Betrachtung der geforderten Restriktionen und Zielsetzungen bestmöglich zu nutzen. Neben solchen, meist sehr rechenaufwendigen und damit zeitintensiven Constraint-basierten Verfahren, gibt es auch eine Reihe von heuristischen Verfahren zur Maschinenbelegungsplanung. Diesbezüglich ist der Einsatz von Prioritätsregeln in der Unternehmenspraxis vielfach anzutreffen. Bekannte Regeln dieser Art sind beispielsweise:

- FIFO: First-In-First-Out
- LIFO: Last-In-First-Out
- KOZ: Kürzeste Operationszeitregel
- LOZ: Längste Operationszeitregel
- GRB: Größte Restbearbeitungszeitregel
- KRB: Kürzeste Restbearbeitungszeitregel
- EDD: Earliest-Due-Date

Mit Hilfe der Simulationssoftware Plant Simulation 12 wird in diesem Beitrag untersucht, wie sich die Anwendung solcher Prioritätsregeln in der Maschinenbelegungs-

planung auf den Gesamtenergieverbrauch und damit auf die entstehenden Energiekosten einer Werkstattfertigung auswirkt. Im Mittelpunkt steht hierbei der von der Produktion nicht direkt verursachte Energiebedarf, der beispielsweise im Standby-Modus und beim Hoch- bzw. Herunterfahren von Anlagen auftritt (siehe beispielhaft Abb. 2).

Ziel der Untersuchung ist es, die Relevanz der Betrachtung von Energiebedarfen und der damit verbundenen Kosten im Bereich der Feinplanung simulativ zu beurteilen.

### 3 Simulationsuntersuchung

#### 3.1 Aufbau der Simulationsuntersuchung

Das modellierte Produktionssystem besteht aus neun Maschinen mit jeweils einer Warteschlange (Abb. 3).

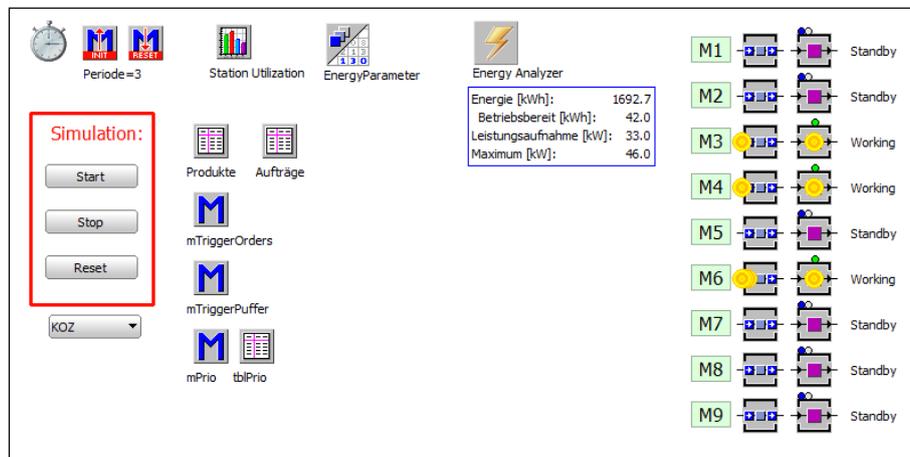


Abbildung 3: Aufbau des Simulationsnetzwerks

Alle Maschinen sind hinsichtlich ihrer Energieparameter und Übergangszeiten gleich beschaffen (Abb. 4).

Die Überwachung sämtlicher Leistungsaufnahmen gewährleistet der Baustein *Energy Analyzer*. Er kumuliert die einzelnen Verbräuche in den verschiedenen Betriebszuständen jeder Maschine einzeln und protokolliert diese.

Mit Auftragsstart werden Aufträge zunächst nach FIFO-Reglement den Warteschlangen der jeweiligen Maschinen zugewiesen. Je nach Prioritätsregel wird dann die Reihenfolge der Aufträge in der Warteschlange bestimmt und diese entsprechend sortiert bevor der nächste Auftrag auf die Maschine bearbeitet wird.

Jede Maschine wird erst dann hochgefahren, wenn sie von einem Auftrag benötigt wird und erst dann wieder heruntergefahren, wenn kein Auftrag mehr für die Maschine vorgesehen ist. Wird die Maschine in der Zwischenzeit nicht benötigt, nutzt sie einen Standby-Modus um Energie und Zeit für das Hoch- und Herunterfahren zu sparen. Dieses Verhalten dient in der Praxis zur Absicherung der Prozessstabilität. Ein

häufiges Hoch- und Herunterfahren von Anlagen würde im beschriebenen Beispiel die Gesamtdurchlaufzeit stark verlängern.

**Abbildung 4:** Energieparameter der Maschinen

Hat ein Auftrag eine Maschine durchlaufen, wird er in die Warteschlange der nächsten Station gelegt und dort erneut nach Anwendung der gewählten Prioritätsregel auf der Folgestation bearbeitet. Fertige Aufträge verlassen das System.

Aufgrund der Seitenlimitierung dieser Arbeit können die Aufträge und Arbeitspläne der einzelnen Produkte nicht mit aufgeführt werden. Für diese Untersuchung ist die Struktur der Aufträge und Arbeitspläne jedoch nicht direkt relevant, da lediglich geprüft wird, ob signifikante Unterschiede in der Leistungsaufnahme bei Anwendung verschiedener Planungsstrategien auf denselben Auftragspool bestehen.

Um die Experimente bewerten zu können, werden neben allen energetisch relevanten Daten zu den Maschinen auch die Durchlaufzeiten und die Auslastung aller Ressourcen und deren Betriebszustände protokolliert.

## 3.2 Ergebnisse der Simulationsuntersuchung

### 3.2.1 Gesamtenergiebedarf versus Gesamtdurchlaufzeit

Bei der Bewertung der einzelnen Simulationsläufe sollte insbesondere der Gesamtenergiebedarf aller Maschinen und die Gesamtdurchlaufzeit aller Aufträge miteinander verglichen werden. Da die Rüst- und Bearbeitungszeiten für alle Experimente gleich sind und jede Maschine auch nur zu Fertigungsbeginn und -ende hoch- bzw. heruntergefahren wird, kann festgehalten werden, dass längere Durchlaufzeiten mit längeren Standby-Zeiten einhergehen. Da der Standby-Betrieb dieser Maschinen nicht zu vernachlässigen ist, wirkt sich dies signifikant auf den Gesamtenergiebedarf des Produktionssystems aus.

Zunächst erscheint es schlüssig, dass bei einer längeren Durchlaufzeit mehr Energiebedarf auf den Standby-Betrieb entfällt und damit auch der Gesamtenergiebedarf größer ist. Dass zwischen diesen beiden Größen kein linearer Zusammenhang besteht, zeigt der Vergleich der jeweiligen Auswertung in Abbildung 5 und Abbildung 6.

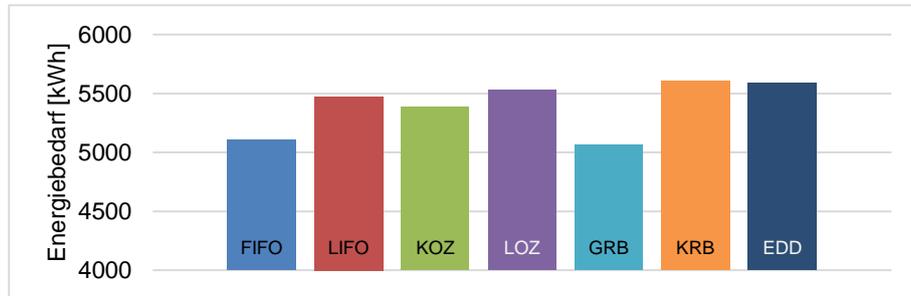


Abbildung 5: Gesamtenergiebedarf nach Prioritätsregel

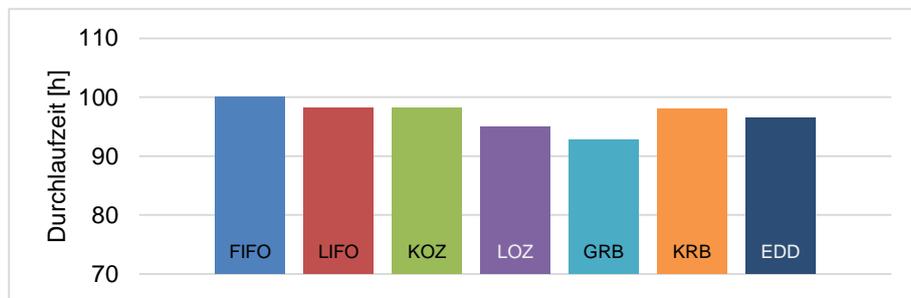
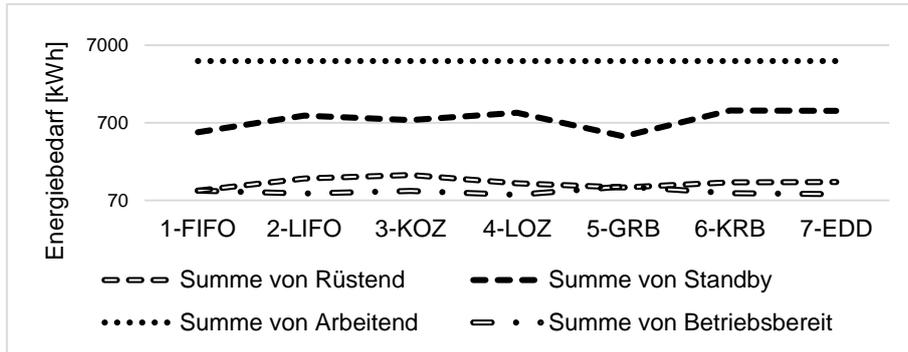


Abbildung 6: Summe der Durchlaufzeit aller Aufträge nach Prioritätsregel

Die beste Prioritätsregel hinsichtlich Durchlaufzeit und Energieverbrauch ist die Regel nach der größten Restbearbeitungszeit (GRB). Den geringsten Energiebedarf benötigt die FIFO-Regelung mit 51 kWh, was auf einen erhöhten Anteil an Standby-Betrieb zurückzuführen ist. Selbstverständlich ist die Prioritätsregel nach der größten Restbearbeitungszeit nicht als Patentlösung für eine sowohl schnelle als auch ressourcenschonende Bearbeitung in der Werkstattfertigung zu werten. Welche Prioritätsregeln zielführend sind hängt von der Auftragsstruktur und unternehmensspezifischen Zielsetzungen ab.

### 3.2.2 Flexible Energiebedarfe

Nachfolgende Abbildung 7 erläutert den Energiebedarf in den verschiedenen Betriebszuständen nach angewandter Prioritätsregel. Zu erkennen sind deutlich die zwischen 470 kWh und 1011 kWh schwankenden Standby-Energiebedarfe der einzelnen Szenarien.



**Abbildung 7:** Anteil am Gesamtenergiebedarf je Betriebszustand nach Prioritätsregel

### 3.2.3 Erkenntnisse

Die Simulationsergebnisse haben gezeigt, dass es einen Bezug zwischen der Maschinenbelegungsplanung und der aufzuwendenden Energie in einer Werkstattfertigung gibt und sich dieser nicht linear zur Betriebszeit bzw. Gesamtdurchlaufzeit verhält. Infolgedessen existiert ein Optimierungspotential, das sich wie folgt erläutern lässt.

Die Abbildungen 8 und 9 zeigen in beiden Fällen einen gültigen Belegungsplan für dasselbe Szenario ohne Verspätungen. Der erste Belegungsplan nach FIFO nutzt infolge der späteren Starttermine für Job 3 bis 5 den Standby-Betrieb um die Prozessstabilität zu gewährleisten.

Geht man von einer Leistungsaufnahme wie in Tabelle 3 aufgeführt aus, so benötigt der Ablaufplan nach Abbildung 8 einen Gesamtenergiebedarf von 292 kWh im Planungszeitraum.

Im zweiten Belegungsplan (Abbildung 9) wird die zeitliche Flexibilität von Job 1 und 2 dazu genutzt, die Standby-Zeiten zu verkürzen. Alle Maschinen werden wesentlich später hochgefahren, um alle Aufträge ohne Pausen zu bearbeiten. Dieser Plan benötigt im Planungszeitraum einen Gesamtenergiebedarf von 245 kWh. Im Vergleich zur Planung nach FIFO ergibt sich eine Energieeinsparung von 16 %. Der Standby-Energiebedarf für dieses Beispiel ist im Vergleich zur industriellen Praxis gering. Enthalten Maschinen Kühlaggregate oder Laser, so sind Leistungsabrufe während des Standby-Betriebs von 10 kW/h oder mehr keine Seltenheit.

**Tabelle 3:** Beispielhafte Leistungsaufnahme für fünf Maschinen in kW/h

	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M <sub>3</sub>	M <sub>4</sub>	M <sub>5</sub>
Standby	4	4	4	4	4
Hochfahrend	10	10	10	10	10
Herunterfahren	5	5	5	5	5
Rüstend	10	10	10	10	10
Bearbeitend	10	10	10	10	10

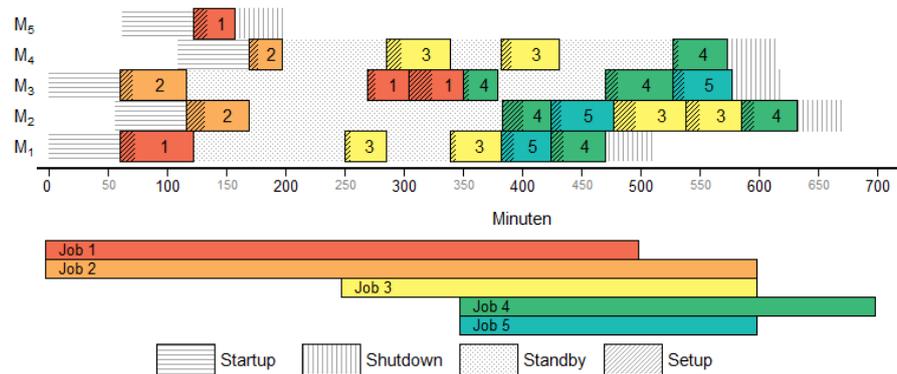


Abbildung 8: Gültiger Maschinenbelegungsplan ohne Verspätungen

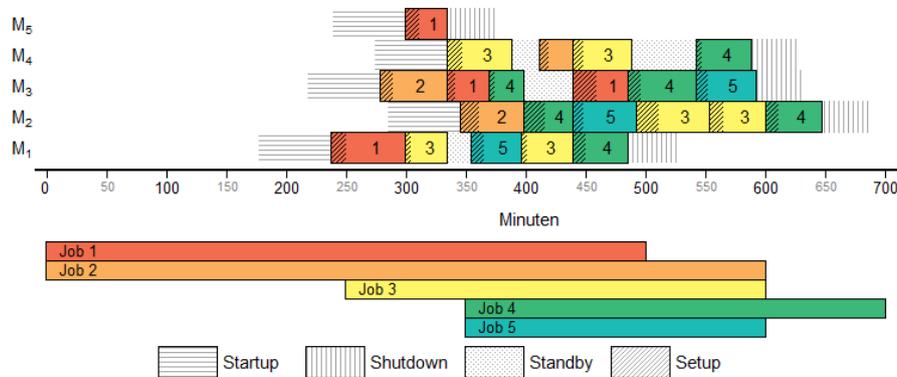


Abbildung 9: Nach Energiebedarf optimierter Maschinenbelegungsplan ohne Verspätungen

#### 4 Ausblick

Grundsätzlich müsste ein Optimierungsverfahren zur nachhaltigen Maschinenbelegungsplanung die nicht von der Produktion selbst verursachten Energiebedarfe berücksichtigen: das Hoch- und Herunterfahren und den Standby-Betrieb von Maschinen. Bei Maschinen mit einem höheren Standby-Verbrauch würden dann verstärkt Leerzeiten vermieden werden. Maschinen könnten außerdem geplant herunter- und wieder hochgefahren werden, um in langen Wartezeiten Energie einzusparen. Dies ist dann der Fall, wenn der Standby-Verbrauch über den Wartezeitraum höher ist, als der Energiebedarf zum Herunter- und wieder Hochfahren.

Um den Energiebedarf für ein Optimierungsverfahren korrekt mit Kosten zu bewerten, müsste ein flexibler Energiepreis über den Planungszeitraum angenommen werden, da produzierende Unternehmen in der Regel Sonderverträge abschließen, welche individuell abgestimmte Energietarife enthalten. Die üblichen Bestandteile des so festgelegten Energiepreises sind nach Bönig (2013) in der Regel:

- Arbeitspreis: Darunter ist der Preis für eine bezogene kWh zu verstehen. Er fällt für die tatsächlich genutzten Kilowattstunden elektrischer Arbeit an und kann in Abhängigkeit des Tages variieren.
- Leistungspreis: Er wird für die Bereitstellung der elektrischen Arbeit berechnet. Die maximale Leistung, also die Lastspitze, innerhalb eines Abrechnungszeitraums ist hier der Multiplikator für die Berechnung.
- Verrechnungspreis: Der Verrechnungspreis beinhaltet den Abschlag für die vom Energieversorger installierten Zähler und Messgeräte.
- Blindleistungsanteil: Unternimmt ein Unternehmen keine Blindleistungskompensation, so muss infolge dessen ein Blindleistungsanteil abgetreten werden.
- Hinzu kommen noch Nutzungsentgelte, Abgaben, Umlagen und Steuern.

## Literatur

- Bauernhansel, T.; Mandel, J.; Wahren, S.; Kasprovicz, R.; Mieke, R.: Energieeffizient in Deutschland. Stuttgart: Institut für Energieeffizient in der Produktion 2013
- BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.: Industriestrompreise, 28.04.2014.
- Bönig, C.: Entwicklung einer Methode zu energiekostenorientierten Belegungsplanung. Schlussbericht der AiF-Forschungsvereinigung, 11.11.2013
- Neugebauer, R.: Untersuchung zur Energieeffizienz in der Produktion. München: Fraunhofer Gesellschaft 2008
- Wagner, J.; Schäfer, M.; Kohl, D.; Thide, H.; Grüning, C.; Hesselbach, J.; Böhm, S.: Energieeffizienz in der Industrie. Productivity Management 17 (2012) 4, S. 47-50.