

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 **16904 N**

Entwicklung einer Methode zu energiekostenorientierten Belegungsplanung

(Bewilligungszeitraum: 01.08.2011 - 31.07.2013)

der AiF-Forschungsvereinigung

Bundesvereinigung Logistik e. V. (BVL)

Hannover, 11.11.2013

Ort, Datum

Christian Böning

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	3
2 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung	4
3 Gegenüberstellung angestrebter Teilziele und erzielter Ergebnisse	5
4 Darstellung der erzielten Ergebnisse	7
4.1 Analyse	7
4.1.1 Analyse von Strompreis, Energietarifen und Leistungsmessungen	8
4.1.2 Durch Belegungsplanung beeinflussbare Bestandteile der Energiekosten	13
4.2 Konzeption	13
4.2.1 Lösungsansatz und Einordnung des Planungsproblems	13
4.2.2 Entwicklung der Zielfunktion	15
4.2.3 Einführung von Energiephasen	19
4.2.4 Formulierung des kombinatorischen Optimierungsproblems	21
4.2.5 Kritische Diskussion	29
4.3 Implementierung der Methode zur energiekostenorientierten Belegungsplanung	31
4.3.1 Nachweis der Wirksamkeit des Ecs-fjssp	31
4.3.2 Entwicklung eines hybriden genetischen Algorithmus	32
4.4 Validierung	41
4.4.1 Verifikation des Kostensenkungspotentials	42
4.4.2 Validierung des hybriden genetischen Algorithmus	44
4.4.3 Validierung anhand von Realdaten	46
5 Innovativer Beitrag und wirtschaftlicher Nutzen	51
5.1 Voraussichtliche Nutzung der angestrebten Forschungsergebnisse	51
5.2 Möglicher Beitrag zur Steigerung der Leistungs- und Wettbewerbsfähigkeit kleiner und mittlerer Unternehmen	51
6 Verwendung der Zuwendung	52
7 Umsetzung der Forschungsergebnisse / Transfer der Ergebnisse in die Wirtschaft	52

8 Durchführende Forschungsstelle	54
9 Förderhinweis	56
10 Anhang	57
11 Literaturverzeichnis	59
12 Abbildungsverzeichnis	61
13 Tabellenverzeichnis	61

1 Zusammenfassung

In produzierenden Unternehmen haben die Energiekosten einen erheblichen Anteil an den Produktionskosten. Im Laufe des letzten Jahrzehnts sind die Energiepreise deutlich angestiegen [BEW12, Wag12]. Zukünftige Ereignisse, wie der Atomausstieg und der Netzausbau lassen weitere deutliche Preisanstiege erwarten [Sch11]. Insbesondere für kleine und mittlere Unternehmen (KMU) in energieintensiven Branchen (bspw. der Schmiedeindustrie) führt dies zu erheblichen finanziellen Belastungen. Daher haben diese Unternehmen ein großes Interesse daran ihre Energiekosten zu senken. Dafür stehen multiple Maßnahmen bereit, mit denen sich die Energieeffizienz verbessern lässt. Diese Maßnahmen, mit denen die bezogene Energiemenge reduziert werden kann, erfordern aber, bspw. bei der Erneuerung der Technischen Gebäudeausrüstung (TGA), immer einen Kapitaleinsatz. Dies führt kurzfristig zu einer weiteren Erhöhung der finanziellen Belastung für KMU. Ein weiterer, bislang nicht intensiv betrachteter Ansatz ist, die Kosten für die bezogene Energiemenge zu senken, wobei der eigentliche Energieverbrauch konstant bleibt. Dies hat für KMU den Vorteil, dass zumindest kurzfristig keine größeren Investitionen notwendig werden und dennoch Kosten eingespart werden können. Als Mittel zur Senkung der Energiekosten bei konstantem Energieverbrauch kann die Produktionsplanung und -steuerung (PPS) dienen. Ein Bereich der PPS, welcher einen unmittelbaren Effekt auf die Energiekosten eines Unternehmens hat, ist die Belegungsplanung. Die Belegungsplanung legt fest, zu welcher Zeit und in welcher Reihenfolge Fertigungsaufträge auf einer Maschine bearbeitet werden. Dabei wird die Maschinenbelegung im Hinblick auf eine bestimmte logistische Zielgröße optimiert (z. B. kurze Durchlaufzeiten). Keines der existierenden Verfahren zur Belegungsplanung ist jedoch in der Lage, eine Optimierung hinsichtlich der Energiekosten durchzuführen.

Als Ergebnis dieses Vorhabens ist eine Methode entstanden, die eine energiekostenorientierte Belegungsplanung erlaubt. Die Methode erstellt Belegungspläne, in denen Fertigungsaufträge derart auf Maschinen eingeplant werden, dass sich der entstehende Energieverbrauchsverlauf der gesamten Fertigung über der Zeit nivelliert und somit Energiekosten eingespart werden. Gleichzeitig stellt die Methode die Einhaltung der logistischen Zielgrößen Durchlaufzeit, Bestand, Auslastung und Termintreue sicher. Die Umsetzung der Methode in Form eines hybriden genetischen Algorithmus ermöglicht KMU eine aufwandarme Anwendung der erzielten Ergebnisse. Durch die Anwendung der Methode können KMU die entstehenden Kosten für die bezogene Energiemenge senken, ohne eine merkbare Verschlechterung der logistischen Zielgrößen (bspw. nichteinhalten eines zugesagten Liefertermins) in Kauf nehmen zu müssen.

Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.

2 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

In produzierenden Unternehmen haben die Energiekosten einen erheblichen Anteil an den Produktionskosten und damit am Umsatz der Unternehmen. 30 % des Gesamtenergiebedarfes entfällt dabei auf die mechanische Energie [Eng09]. Zwischen 2000 und 2006 sind die Strom- und Erdgaspreise um ca. 70 % gestiegen [Bmw08]. Experten prognostizieren weiter steigende Energiepreise. Ein Großteil der Energieexperten geht davon aus, dass zukünftig anfallende Kosten durch den Netzausbau an den Endverbraucher weitergegeben und bereits mittelfristig die Energiepreise erneut steigen werden. Da Energie nicht oder nur sehr geringfügig durch andere Produktivkräfte (bspw. menschliche Arbeit) ersetzt werden kann, werden produzierende Unternehmen auch zukünftig mit steigenden Energiekosten konfrontiert.

Bei einer auftragsbezogenen Produktion treten durch die zeitliche Überlagerung einzelner Fertigungsaufträge große Schwankungen in der Energienachfrage über der Zeit auf [Rag06]. Schwankungen des Energiebedarfs sind für produzierende Unternehmen mit hohen Kosten verbunden, da entstehende Lastspitzen eine Grundlage für die Berechnung der Energiekosten darstellen [Eng09]. Durch eine Beeinflussung der zeitlichen Abfolge der Fertigung von Aufträgen kann der Energieverbrauchsverlauf über der Zeit jedoch stark beeinflusst werden.

Eine wichtige und bei energieintensiven Unternehmen weit verbreitete Lösung zur Reduzierung von Lastspitzen ist der Einsatz eines Lastmanagements. Hierbei werden zu Zeiten hoher Energienachfrage Nebenanlagen abgeschaltet. Dies ist jedoch nur in begrenztem Umfang möglich und kann zudem die logistischen Zielgrößen (bspw. die Einhaltung eines Liefertermins) negativ beeinflussen. ENGELMANN und MÜLLER beschreiben die weiteren Möglichkeiten zur Senkung der Energiekosten in einer Fabrik [Eng09] wie folgt:

- Verschiebung von energieintensiven Prozessen von der Hochtarif- in die Niedertarifzeit,
- Erhöhung der Zuverlässigkeit der Lastspitzenprognose für Energie,
- Vermeidung von Lastspitzen

Die Belegungsplanung ist das Teilgebiet der Produktionsplanung und -steuerung (PPS), in dem über den Ressourceneinsatz und damit den zeitlichen Energieverbrauchsverlauf entschieden wird. In der Literatur vorgestellte Methoden, die den Energieverbrauch in der Planung mit dem Ziel der Minimierung berücksichtigen, vernachlässigen logistische Ziele [Jun07] oder energieintensive Rüstvorgänge [Rag06].

3 Gegenüberstellung angestrebter Teilziele und erzielter Ergebnisse

Ziel des Forschungsvorhabens war die Entwicklung einer Methode zur energiekostenorientierten Belegungsplanung, die insbesondere von kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) angewendet werden kann. Die Methode sollte eine Reduzierung der durch einen Belegungsplan 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 Aufnahme von Energiebedarfen in verschiedenen Prozesszuständen vorhandener Ressourcen der Fertigung (Maschinen, Anlagen) sowie der Entwicklung eines allgemeingültigen Verfahrens, um ausgehend von gegebenen Belegungsplänen den voraussichtlichen Energieverbrauch über der Zeit abzuleiten. Des Weiteren wird die Energie als virtuelle Ressource unter Berücksichtigung der Kapazitätsflexibilität nach BREITHAUPT definiert. Dies ermöglicht die Nutzung der Energie als zu planende Kapazität in Anlehnung an die Planung mit beschränkten Ressourcenkapazitäten im Rahmen der Belegungsplanung. Die Erreichung von Teilziel 1 wird durch die Entwicklung eines Algorithmus abgeschlossen, der die Start- und Endtermine der Arbeitsvorgänge und die Zuteilung der Aufträge zu Maschinen dahingehend verändert, dass der Energieverbrauchsverlauf über der Zeit nivelliert wird.*

Korrespondierende Ergebnisse des Vorhabens:

In Arbeitspaket 1 erfolgte die Aufnahme von Energieverbräuchen und zugehörigen Auftragsdaten in zwei KMU. Die Energieverbräuche wurden durch ein im Projekt angeschafftes Messgerät auftragsbezogen erfasst und anschließend aufbereitet. Die Aufbereitung beinhaltete einerseits die Aufteilung der Energieverbräuche in Energiephasen mit konstantem Energieverbrauch und andererseits die Prüfung, ob die Aufträge der ausgewählten KMU die zentrale Voraussetzung für eine energiekostenorientierte Belegungsplanung erfüllen. Diese Voraussetzung forderte, dass der Energieverbrauch einer Maschine auftragsabhängig ist und wurde für alle aufgenommenen Aufträge und Maschinen erfüllt. Zur Ermittlung des Energieverbrauchsverlaufs aus einem Belegungsplan wurde ein Verfahren entwickelt, welches die Energieverbräuche aller parallel laufenden Maschinen addiert und über der Zeit aufträgt. In AP 2 wurde Energie als Ressource definiert, um sie in die PPS integrieren zu können. Danach ist Energie eine Ressource, die dauerhaft und ohne Wartezeit zu Verfügung steht. Weiterhin erfolgte in AP 2 die Identifikation durch die Belegungsplanung beeinflussbarer Bestandteile des Strompreises, deren Berechnungsgrundlagen

sowie existierender Energietarife. In AP 3 wurde die Methode zur energiekostenorientierten Belegungsplanung entwickelt und als kombinatorisches Optimierungsproblem mathematisch formuliert. Dabei wurden eine zu minimierende Zielfunktion sowie einzuhaltende Nebenbedingungen für die Erstellung eines zulässigen Belegungsplans erstellt.

Teilziel 2:

Angestrebtes Teilziel aus dem Forschungsantrag: *Teilziel 2 besteht aus der Entwicklung eines Bewertungsmodells (Kostenmodell) zur Ermittlung des kostenminimalen, zulässigen (nicht gegen Kapazitätsrestriktionen verstoßenden) Belegungsplans, der Festlegung von diversen zu simulierenden Szenarien (Versuchsplanung) für die Belegungsplanung und abschließend der Simulation der zulässigen Belegungspläne. Die Simulation dient der Ermittlung des Einflusses der unterschiedlichen Belegungspläne auf den Energieverlauf über der Zeit, die damit verbundenen Kosten und des Einflusses auf die logistischen Kennzahlen (Bestand, Auslastung, Durchlaufzeit).*

Korrespondierende Ergebnisse des Vorhabens:

Die Entwicklung des Kostenmodells zur Bewertung eines Belegungsplans erfolgte in AP 4. Das Kostenmodell beinhaltet Kosten für die Kapitalbindung, für nicht genutzte Kapazität sowie Energiekosten. Das Kostenmodell wurde in die Zielfunktion des in AP 3 formulierten kombinatorischen Optimierungsproblems integriert. Die in AP 5 angedachte Simulation ist für den Nachweis der Wirksamkeit der entwickelten Methode wurde nicht durchgeführt. Der Nachweis der Wirksamkeit der entwickelten Methode erfolgte stattdessen durch die Implementierung des kombinatorischen Optimierungsproblems und die Lösung mittels eines exakten Verfahrens der kombinatorischen Optimierung. Nachdem die Funktionsfähigkeit sichergestellt wurde, erfolgte die Entwicklung eines heuristischen Lösungsansatzes in Form eines hybriden genetischen Algorithmus (HGA) auf Basis des Optimierungsproblems. Dies war notwendig, da das kombinatorische Optimierungsproblem mithilfe exakter Verfahren für große Testinstanzen aufgrund der entstehenden Komplexität nicht mehr lösbar war. Der HGA kann auch auf komplexe Testinstanzen angewendet werden. Dieser ergibt aber nicht zuverlässig die optimale Lösung. Dafür wird eine wesentlich geringere Rechenzeit zur Lösung benötigt. Zur Prüfung der Funktionalität sowie als Vergleichsgrundlage für den HGA war die Lösung des kombinatorischen Optimierungsproblems mit einem exakten Verfahren notwendig.

Teilziel 3:

Angestrebtes Teilziel aus dem Forschungsantrag: *Teilziel 3 ist der Test des Modells mit Realdaten in zwei KMU. Dazu müssen Ist-Daten vor und während der Testphase*

aufgenommen werden, um einen Vergleich einer herkömmlichen mit einer energie-kostenorientierten Belegungsplanung erstellen zu können. Auf Basis der Testergebnisse werden der Algorithmus und die Methode zur energiekostenorientierten Belegungsplanung angepasst. Auf diese Weise wird die Verifizierung der Methode in KMU sichergestellt.

Korrespondierende Ergebnisse des Vorhabens:

In AP 6 erfolgte die Validierung der Methode zur energiekostenorientierten Belegungsplanung. Diese erfolgte in drei Schritten. Zunächst wurde das Kostensenkungspotential der entwickelten Methode nachgewiesen. Hierfür wurden Testinstanzen einmal mit Berücksichtigung der energetischen Zielfunktion und einmal ohne dessen Berücksichtigung gelöst. Im zweiten Schritt erfolgte die Identifikation der Lösungsgüte des HGA durch den Vergleich mit, durch das exakte Verfahren erstellte, Lösungen für kleine Testinstanzen. Letztlich erfolgte die Validierung der Methode anhand der in AP 1 aufgenommenen Realdaten. Mit diesen Daten wurde mittels des HGA ein Belegungsplan errechnet, der mit einem durch den Produktionsplaner eines der KMU erstellten Belegungsplan verglichen wurde.

4 Darstellung der erzielten Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die erzielten Ergebnisse detailliert dargestellt. Die Darstellung ist in die vier Schritte Analyse, Konzeption, Implementierung und Validierung unterteilt.

4.1 Analyse

Die Analyse umfasste in Kapitel 4.1.1 zunächst eine Recherche über die Zusammensetzung des Strompreises für energieintensive Unternehmen und Bestandteilen von Energietarifen. Daraufhin wurde die Energie als Ressource definiert, um sie im weiteren Verlauf des Forschungsprojekts innerhalb der PPS verwenden zu können. Danach erfolgte eine Darstellung, wie die Energieversorger die Leistungsmessung vornehmen. Durch die Belegungsplanung beeinflussbare Bestandteile der Energiekosten wurden identifiziert und sind in Kapitel 4.1.2 dargestellt. Die folgenden Ergebnisse entstammen neben einer Literaturrecherche im Wesentlichen Interviews mit Mitarbeitern des Energieversorgers EnBW und des Projektbegleitenden Ausschusses (PA).

4.1.1 Analyse von Strompreis, Energietarifen und Leistungsmessungen

Produzierende Unternehmen schließen für den Energiebezug mit den Energieversorgern in der Regel Sonderverträge ab, welche individuell auf ihr Unternehmen abgestimmte Energietarife beinhalten. Übliche Bestandteile des im Vertrag festgelegten Strompreises werden nachfolgend dargestellt.

- **Arbeitspreis:** Der Arbeitspreis ist der Preis für eine bezogene Kilowattstunde und fällt für die genutzte elektrische Arbeit an. Der Preis wird mit der Anzahl an bezogenen Kilowattstunden multipliziert und kann in Abhängigkeit der Tageszeit variieren.
- **Leistungspreis:** Der Leistungspreis (€ / kW) wird für die Bereitstellung der elektrischen Arbeit berechnet. Dieser wird mit der maximalen Leistung (der Lastspitze) des Abrechnungszeitraums (in kW) multipliziert.
- **Verrechnungspreis:** Der Verrechnungspreis fällt jährlich für die installierten Zähler und Messgeräte des Energieversorgers an.
- **Blindleistungsanteil:** Der Strompreis kann einen Blindleistungsanteil enthalten, wenn ein Unternehmen keine Blindleistungskompensation vornimmt und infolge dessen nicht wie gefordert einen Leistungsfaktor $\cos \varphi \geq 0,9$ besitzt. Der Leistungsfaktor ergibt sich aus dem Kosinus des Quotienten aus Wirkleistung zu Scheinleistung.
- Netznutzungsentgelte
- Abgaben, Umlagen und Steuern

In den individuell vereinbarten Energietarifen können nun auf Basis der geplanten Jahresnutzungsstunden die beschriebenen Strompreisbestandteile unterschiedliche Ausprägungen annehmen und verschiedene Bestandteile enthalten sein. Die vertraglich vereinbarte Laufzeit von Energietarifen beträgt bei KMU in der Regel ein Jahr oder länger. Die Jahresnutzungsstunden errechnen sich aus dem Energieverbrauch in Kilowattstunden (kWh) pro Jahr geteilt durch die maximale Leistung in Kilowatt (kW). Je höher die geplanten Jahresnutzungsstunden sind, desto höher fällt der Leistungspreis pro kW aus. Gleichzeitig sinkt bei einer Erhöhung der Jahresnutzungsstunden der Arbeitspreis. Die Abrechnung für den Leistungspreis erfolgt üblicherweise jährlich, kann aber auch halbjährlich oder vierteljährlich erfolgen. Je kürzer der Abrechnungszeitraum ist, desto geringer wirkt sich eine hohe Lastspitze auf die jährlichen Stromkosten aus. Bei kürzeren Abrechnungszeiträumen kann sich der Leistungspreis pro kW allerdings erhöhen. Weiterhin können sich je nach Region und Versorgungsunternehmen die Arbeits- und Leistungspreise unterscheiden.

Aufgrund der tageszeitlich unterschiedlichen Netzbelastung wird der Arbeitspreis in einen Hoch- und Niedertarif untergliedert. Dabei ist in der Niedertarifzeit der Arbeits-

preis niedriger als in der Hochtarifzeit. Bei der überwiegenden Zahl der Energieversorger gilt für den Zeitraum zwischen 22 und 8 Uhr der Niedertarif. In der Zeit zwischen 8 und 22 Uhr gilt dagegen der Hochtarif. Der Anreiz besteht darin, die Energienachfrage vermehrt in die Niedertarifzeit zu verschieben, damit eine gleichmäßigere Netzbelastung über den Tagesverlauf entsteht.

Für die bereitzustellende Leistung (kW) kann eine vertraglich vereinbarte Leistungsobergrenze festgelegt werden. Bei der in Abbildung 1 dargestellten Überschreitung einer solchen Leistungsobergrenze wird die entstehende Lastspitze mit einem erhöhten Leistungspreis multipliziert. Dies führt zu erheblichen Mehrkosten. Daher sind Unternehmen, deren Energietarif eine vereinbarte Leistungsobergrenze beinhaltet, besonders an einer Vermeidung von Lastspitzen interessiert. Weiterhin kann in einem Energietarif eine Mindestabnahmemenge enthalten sein.

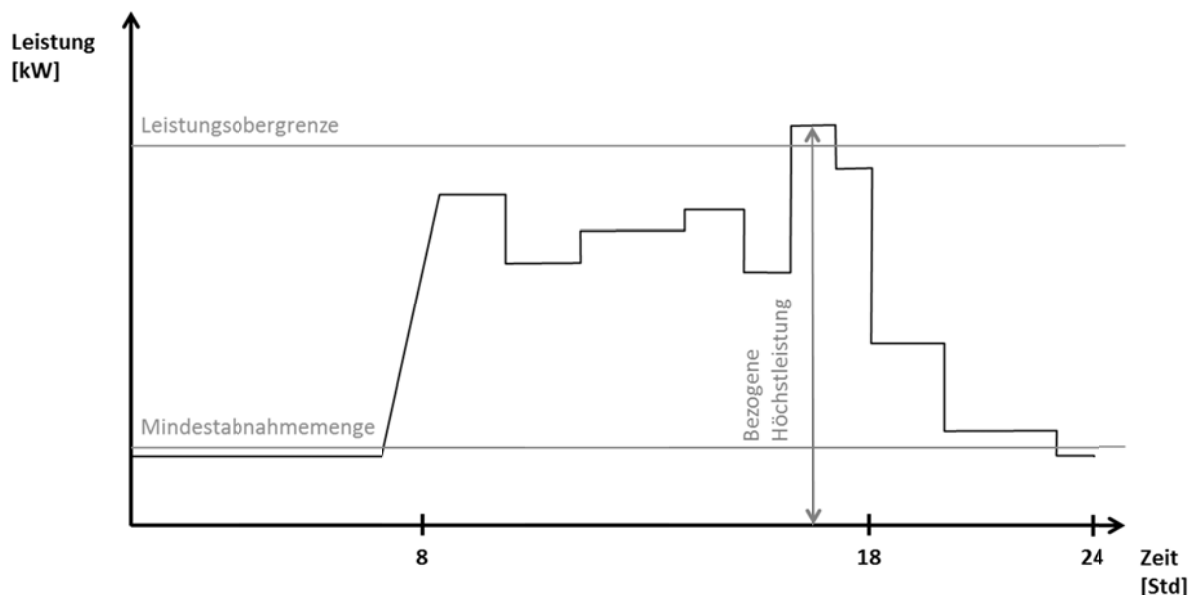


Abbildung 1: Energieverbrauch mit vereinbarten Leistungsgrenzen

Eine Anpassung des Energietarifs zur Festlegung einer veränderten Leistungsobergrenze ist generell kurzfristig möglich. Allerdings kann bei der Erhöhung der Leistungsobergrenze letztendlich ein Netzausbau zur Bereitstellung der dauerhaft höheren Leistung notwendig werden. Dieser hat einen Baukostenzuschuss zur Folge, welcher pro zusätzliches Kilowatt berechnet und auf den Leistungspreis aufgeschlagen wird. Insgesamt erscheint es eher sinnvoll, benötigte Kapazitätsanpassungen langfristig mit dem Energieversorger zu planen, als kurzfristige Anpassungen vorzunehmen. Vor diesem Hintergrund war eine Anwendung der im Antrag beschriebenen Kapazitätshüllkurven nach BREITHAUP [Bre00] zur Darstellung der Kapazitätsflexibilität von Energie zu prüfen. LÖDDING [Löd08] bezeichnet Kapazitätsflexibilität als „die Fähigkeit der Fertigung, ihre Kapazitäten schnell und kostengünstig und in möglichst großem Ausmaß verändern zu können“. Im Rahmen dieses Forschungsprojekts

konnte die bezogene Leistung als eine Ausprägung der in der Definition angesprochenen Kapazität angesehen werden. Aufgrund der individuell mit den Industrieunternehmen abgestimmten Energietarife, ist eine exakte Darstellung der Kapazitätsflexibilität kaum möglich. Daher wurde mit der folgenden Abbildung 2 eine abstrakte Darstellungsform entwickelt, welche alle Möglichkeiten zur Erhöhung oder Reduzierung der bezogenen Leistung dargestellt.

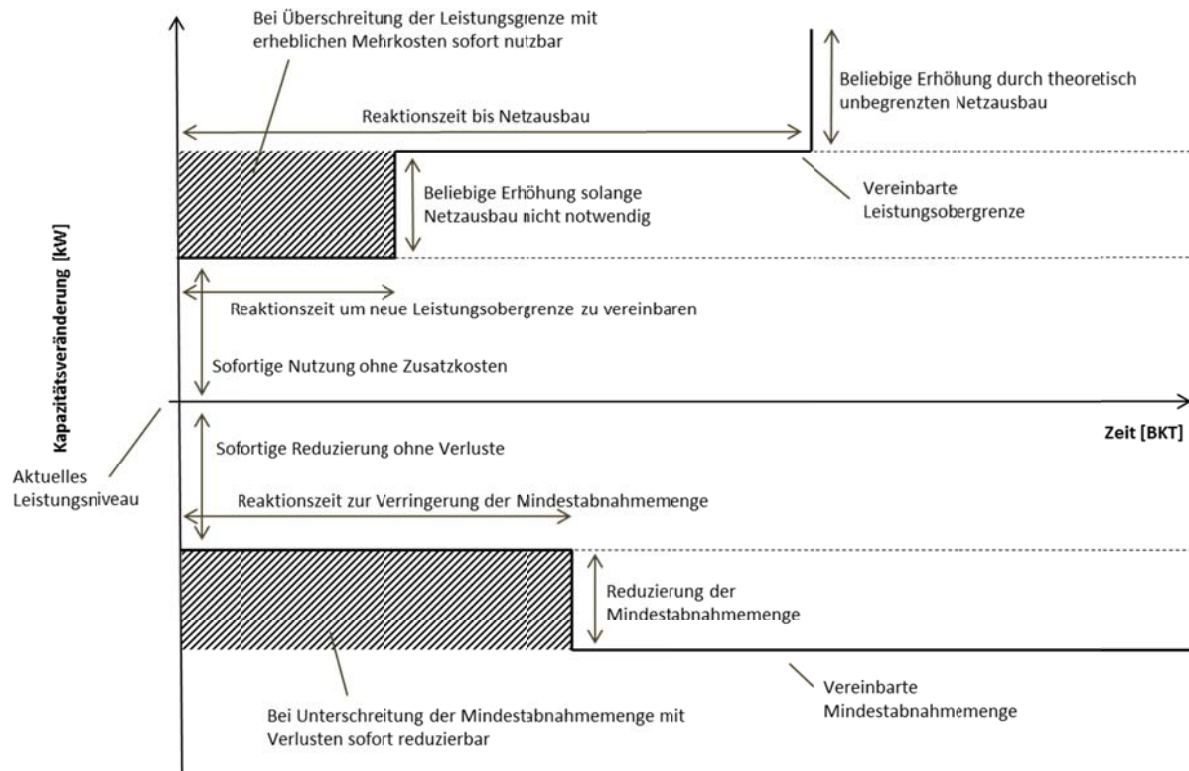


Abbildung 2: Kapazitätshüllkurve von Energie

Ausgehend vom aktuellen Leistungsniveau kann die bezogene Leistung (in kW) ohne Reaktionszeit und ohne die Erhöhung des Leistungspreises bis zu einer u. U. vereinbarten Leistungsobergrenze erweitert werden. Die Leistung lässt sich ebenfalls ohne eine Reaktionszeit auch über eine vereinbarte Leistungsobergrenze hinaus erweitern. Hierbei entstehen allerdings erhebliche Zusatzkosten, da ein höherer Leistungspreises pro kW angesetzt wird. Die Reaktionszeit, um eine Erhöhung der Leistungsobergrenze zu erreichen, wird als die Zeit festgelegt, die für eine Vertragsänderung mit dem Energieversorger benötigt wird. Bei dieser Definition der Reaktionszeit kann die Leistungsobergrenze maximal so weit erhöht werden, wie es das vorhandene Stromnetz zulässt. Eine weitere Erhöhung ist nur durch einen Netzausbau realisierbar, welche nach der Definition von LÖDDING [Löd08] nicht mehr als schnell und kostengünstig bezeichnet werden kann. Eine Reduzierung der aktuell bezogenen Leistung kann ebenfalls ohne Reaktionszeit und ohne monetäre Verluste bis zu einer u. U. vereinbarten Mindestabnahmemenge erfolgen. Eine Reduzierung der Leistung unter die Mindestabnahmemenge ist ebenfalls ohne Reaktionszeit möglich, allerdings dann mit Verlusten verbunden. Diese Verluste entstehen durch

die unvollständige Nutzung der fix zu bezahlenden Mindestabnahmemenge an Energie. Die Mindestabnahmemenge kann reduziert werden. Die Reaktionszeit entspricht wiederum der Zeit, die für eine Vertragsänderung benötigt wird.

Auf Basis dieser Darstellung wurde nun die Energie derart definiert, dass sie als weitere zu betrachtende Ressource in die PPS integriert werden kann. Danach kann Energie als Ressource verstanden werden, die dauerhaft und ohne Wartezeit verfügbar ist. Sie unterliegt hinsichtlich ihrer nutzbaren Menge pro Zeiteinheit im operativen Produktionsbetrieb nahezu keiner Beschränkung. Lediglich die Kosten für die bezogene Energie können sich je nach dem geltenden Energietarif bei einer Erhöhung der Energiemenge in unterschiedlicher Weise erhöhen. Dies hat aber keinen Einfluss auf die Verfügbarkeit der Ressource Energie.

Weiterhin wurde identifiziert, wie die Energieversorger die Leistungsmessung zur Identifikation der Lastspitze durchführen. Die für die Leistungsmessung verwendete Messeinrichtung ist in der Regel am Hauptzähler installiert und erfasst den Energieverbrauch in kWh für ein 15 Minuten Intervall. Die pro Viertelstunde verbrauchte Anzahl an kWh wird kumuliert und durch die 15 Minuten geteilt. Somit entsteht ein Mittelwert in kW. Der höchste Mittelwert eines 15 Minuten Intervalls in einem Abrechnungszeitraum stellt die Lastspitze dar und wird mit dem Leistungspreis multipliziert. Dabei wird nicht erst nach Ablauf eines 15 Minuten Intervalls mit der Messung eines neuen Intervalls gestartet. Die Messeinrichtung startet dagegen fortlaufend, etwa jede Sekunde, die Messung eines neuen 15 Minuten Intervalls. Dies ist notwendig, da sonst die korrekte Höchstleistung u. U. nicht ermittelt wird. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 3 dargestellt.

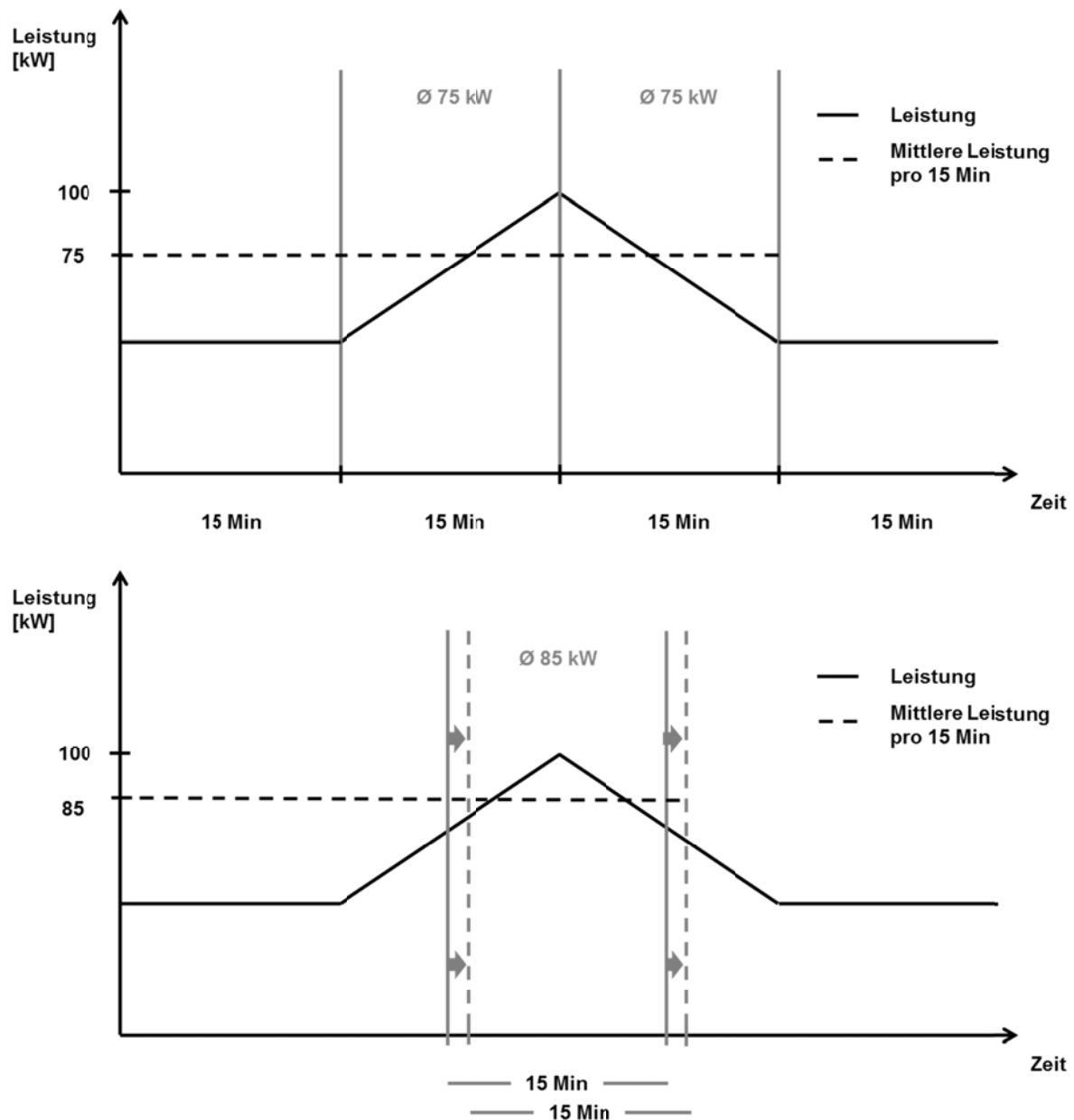


Abbildung 3: Identifikation der Lastspitze durch den Energieversorger

In Abbildung 3 ist ein Energieverbrauchsverlauf für 60 Minuten dargestellt. Wird nun in den vier aufeinander folgenden 15 Minuten Abschnitten nur je ein Mittelwert gebildet, so ergibt sich für die mittleren Intervalle ein maximaler Mittelwert von jeweils 75 kW. Hierdurch wird die korrekte Höchstleistung aber nicht erfasst. Im unteren Teil der Abbildung wird jede Sekunde die Messung eines neuen 15 Minuten Intervalls gestartet. Somit kann die korrekte Höchstleistung von 85 kW erfasst werden. Die Methode zur energiekostenorientierten Belegungsplanung musste an diese Art der Leistungsmessung angepasst sein.

4.1.2 Durch Belegungsplanung beeinflussbare Bestandteile der Energiekosten

Für die Entwicklung der Methode zur energiekostenorientierten Belegungsplanung sind die durch die PPS im Allgemeinen und durch die Belegungsplanung im Besonderen beeinflussbaren Bestandteile der Energiekosten zu identifizieren. Dies sind zum einen der Arbeitspreis und zu anderen der Leistungspreis. Eine Reduzierung der Energiekosten ist möglich, wenn energieintensive Fertigungsaufträge vorrangig in der Niedertarifzeit bearbeitet werden. Der dann geltende geringere Arbeitspreis führt zu einer Reduzierung der Energiekosten. Diese Beeinflussungsmöglichkeit wurde aber aus folgenden Gründen nicht weiter verfolgt: Zunächst wird aktuell auf die Unterscheidung zwischen Hoch- und Niedertarif bei der Tarifgestaltung weitestgehend verzichtet, weil Kunden diesen Tarifbestandteil kaum noch in Anspruch nehmen. Weiterhin ist eine Verlagerung energieintensiver Fertigungsaufträge in die Niedertarifzeit nur sinnvoll, wenn ein Unternehmen mehrschichtig produziert. Bei einem Einschichtbetrieb würde die Einführung einer weiteren Schicht oder die zeitliche Verlagerung der bestehenden Schicht in die Niedertarifzeit zu erheblichen Lohnkostensteigerungen führen, die das Einsparpotential bei den Energiekosten, bis auf Einzelfälle, übersteigen werden. Eine Reduzierung der Energiekosten ist weiterhin durch eine Verringerung der Lastspitze im Abrechnungszeitraum möglich. Durch eine geschickte Einplanung von Fertigungsaufträgen an Maschinen hinsichtlich des Zeitpunktes und der Reihenfolge kann die entstehende Lastspitze eines Belegungsplans verringert und der Energieverbrauchsverlauf der Fertigung nivelliert werden. Durch die Reduzierung der maximal genutzten Leistung reduziert sich der Leistungspreisanteil der Energiekosten, wobei der absolute Energieverbrauch konstant bleibt.

4.2 Konzeption

Die Konzeption umfasste die Entwicklung der Methode zur energiekostenorientierten Belegungsplanung. Dazu erfolgte in Kapitel 4.2.1 zunächst die Einordnung des Planungsproblems sowie die Auswahl des Lösungsansatzes in Form eines kombinatorischen Optimierungsproblems. In Kapitel 4.2.2 erfolgte daraufhin die Entwicklung der Zielfunktion. Kapitel 4.2.3 beinhaltete die Einführung von Energiephasen. Die mathematische Formulierung des kombinatorischen Optimierungsproblems erfolgte in Kapitel 4.2.4. In Kapitel 4.2.5 erfolgte eine kritische Diskussion der entstandenen Methode.

4.2.1 Lösungsansatz und Einordnung des Planungsproblems

Ein durch die Methode der energiekostenorientierten Belegungsplanung entstehender Belegungsplan ordnet einem Fertigungsauftrag eine Maschine und einen Zeitraum zu, in dem dieser bearbeitet wird. Grundsätzlich wurde die Methode für KMU,

deren Produktion in einer Werkstattfertigung organisiert ist, entwickelt und kann innerhalb der Produktionsplanung Anwendung finden. Für die Erstellung eines Belegungsplans steht eine bestimmte Anzahl an Fertigungsaufträgen zur Verfügung, die innerhalb einer festgelegten Anzahl an Planungsperioden – dem Planungshorizont – auf einer gegebenen Anzahl von Maschinen eingeplant werden müssen. Die Fertigungsaufträge können innerhalb des Planungshorizonts jederzeit gestartet werden. Das benötigte Material liegt zu Beginn des Planungshorizonts im Rohteilelager vollständig bereit. Weiterhin sind ein Fertigstellungstermin, die Anzahl benötigter Arbeitsgänge, die Bearbeitungszeiten sowie der zeitliche Energieverbrauch für jeden Fertigungsauftrag bekannt. In der Bearbeitungszeit sind dabei Rüst- und Übergangszeiten mit enthalten und werden im Folgenden nicht separat aufgeführt. Alle Informationen sind deterministisch, also im Vorhinein bekannt und während der Planung nicht veränderbar. Sollte sich innerhalb der Vorlaufzeit zwischen dem Zeitpunkt der Planung des Belegungsplans und dessen Umsetzung eine veränderte Situation ergeben, muss die Belegungsplanung und somit die Methode erneut gestartet werden. Änderungen während der Umsetzung eines Belegungsplans sind Gegenstand der Produktionssteuerung und wurden im durchgeführten Forschungsprojekt nicht betrachtet.

Das Ziel der Methode zur energiekostenorientierten Belegungsplanung ist es, einen Belegungsplan zu erstellen, der einerseits die aus der Anordnung der Fertigungsaufträge entstehenden Energiekosten minimiert und andererseits die Einhaltung der logistischen Zielgrößen Durchlaufzeit, Bestand, Auslastung und Termintreue sicherstellt. Die Ermittlung des optimalen Belegungsplans stellt ein komplexes Anordnungsproblem dar. Aufgrund der zahlreichen einzuhaltenden Restriktionen und der großen Anzahl an potentiellen Anordnungsmöglichkeiten ist die Identifikation der bestmöglichen Anordnung komplex. Eine wie im Forschungsantrag angedachte regelbasierte Vorgehensweise mit dem Verschieben von ausgewählten Fertigungsaufträgen in einem bereits bestehenden Belegungsplan, ist an dieser Stelle noch nicht zielführend, wird aber bei der Implementierung der entstandenen Methode mithilfe eines heuristischen Lösungsansatzes wieder aufgegriffen. Daher wurde die Methode als kombinatorisches Optimierungsproblem mathematisch formuliert. Das kombinatorische Optimierungsproblem beschreibt das Anordnungsproblem algebraisch mithilfe von Gleichungen und Ungleichungen und kann dem Operations Research zugeordnet werden. Es besteht aus einer zu minimierenden Zielfunktion und einzuhaltenden Nebenbedingungen. Das Optimierungsproblem ist dabei der Klasse der „Flexible Job Shop Scheduling Probleme“ (fjssp) zugehörig [Ack11; Fat07]. Dabei werden Fertigungsaufträge (Jobs) zeitlich auf Maschinen eingeplant (Scheduling), wobei sich Freiheitsgrade bei der Auswahl einer konkreten Maschine ergeben können (flexible). Probleme dieser Klasse gehören zu den np-schweren Problemen,

welche nicht in Polynomialzeit lösbar sind. Daher können große Problem instanzen mit exakten Verfahren nicht mehr optimal gelöst werden.

4.2.2 Entwicklung der Zielfunktion

Für die Entwicklung der Zielfunktion des Optimierungsproblems ist es notwendig die logistischen Zielgrößen Durchlaufzeit, Termintreue, Bestand und Auslastung als auch die benötigte elektrische Leistung über der Zeit mathematisch beschreiben zu können. Dafür müssen die logistischen Zielgrößen zunächst mit Informationen aus einem Belegungsplan abgebildet werden können (siehe Abbildung 4):

- Termintreue: Eine Aussage über die Termintreue eines Auftrags kann durch den Vergleich des Fertigstellungszeitpunkts mit dem festgelegten Fertigstellungstermin erreicht werden. Dabei ist in eine zu frühe Fertigstellung (negative Abweichung der Termintreue) und eine zu späte Fertigstellung (positive Abweichung der Termintreue) zu unterscheiden. Beide Möglichkeiten sind aus einem Belegungsplan ersichtlich.
- Bestand: Der Bestand ergibt sich aus der Summe der wartenden Aufträge. Die in Abbildung 4 rot markierten Zeitbereiche geben Aufschluss über die wartenden Bestände. Dabei sind drei Fälle zu unterscheiden:
 - Wartezeiten im Rohteilelager, bevor mit der Bearbeitung eines Auftrags begonnen wird
 - Wartezeiten zwischen den Arbeitsgängen eines Auftrags bis der nachfolgende Arbeitsgang begonnen wird
 - Wartezeiten im Fertigwarenlager nach Abschluss der Bearbeitung aller Arbeitsgänge eines Auftrags
- Durchlaufzeit: Mit den Bearbeitungszeiten (inklusive Rüst- und Übergangszeiten) geben die kumulierten Wartezeiten Aufschluss über die Durchlaufzeit eines Auftrags.
- Auslastung: Die Auslastung einer Maschine ergibt sich aus dem Verhältnis der zur Bearbeitung von Aufträgen genutzten Zeit zu der insgesamt im Planungshorizont zur Verfügung stehenden Zeit.

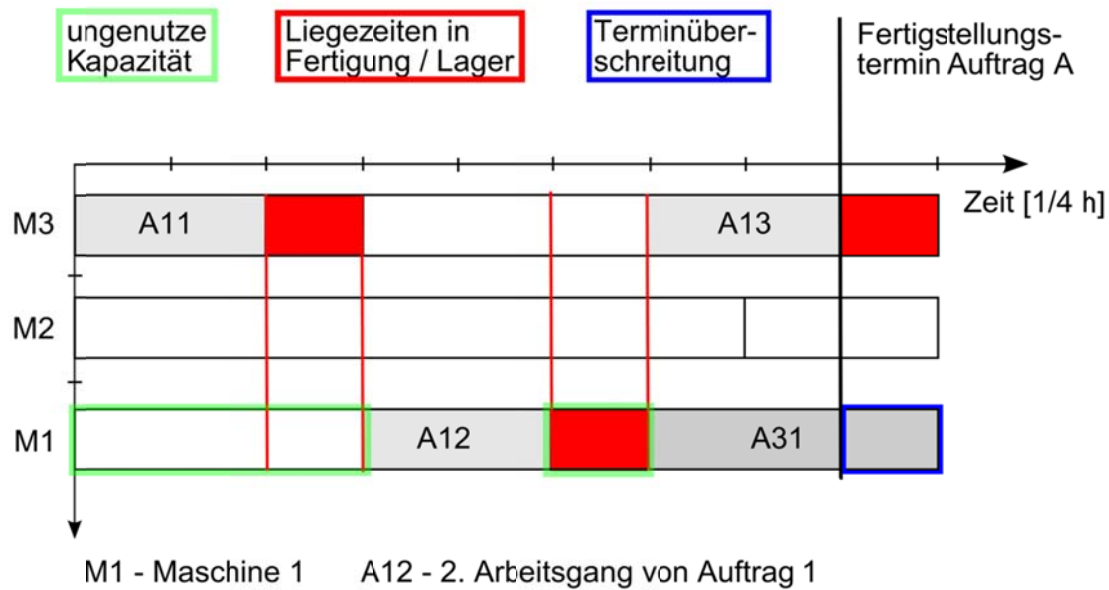


Abbildung 4: Abbildung der logistischen Zielgrößen mit Informationen aus einem Belegungsplan

Die im Zeitverlauf benötigte elektrische Leistung und somit auch die Lastspitze müssen ebenfalls mit Informationen aus einem Belegungsplan abgebildet werden können. Dazu muss der durch die Fertigung entstehende Gesamtenergieverbrauch bekannt sein. Dafür wurde im bearbeiteten Forschungsprojekt ein einfaches Verfahren zur Ermittlung des Energieverbrauchsverlaufs aus einem Belegungsplan entwickelt. Ein Belegungsplan kann wie in Abbildung 5 als GANNT-Diagramm dargestellt werden und ordnet einem Fertigungsauftrag eine Maschine und einen Zeitraum für dessen Bearbeitung zu. Ausgehend von einem Belegungsplan, wie er in Abbildung 5 exemplarisch dargestellt ist, ergibt sich der Gesamtenergieverbrauch der Fertigung für jeden Zeitpunkt durch die Addition der einzelnen Energieverbräuche aller parallel laufenden Maschinen. Durch die Verbindung der einzelnen Werte entsteht der dargestellte Verlauf des Gesamtenergieverbrauchs der Fertigung über der Zeit. Durch die Umgruppierung von Fertigungsaufträgen ist eine Beeinflussung des Energieverbrauchsverlaufs möglich.

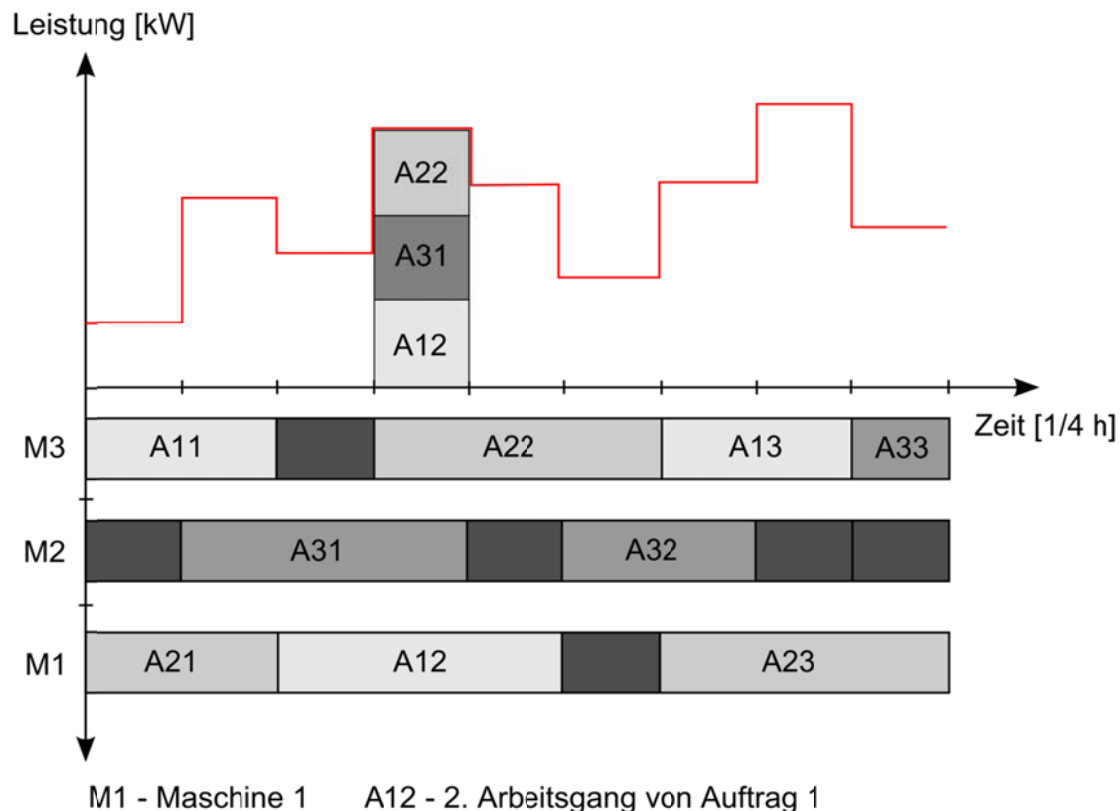


Abbildung 5: Ermittlung des Energieverbrauchsverlaufs aus einem Belegungsplan

Nach der Beschreibung der logistischen und energetischen Zielgrößen mit Informationen aus dem Belegungsplan müssen für diese Größen nun Minimierungsbedingungen generiert werden, um die Zielfunktion formulieren zu können. Durch eine angestrebte Minimierung der Wartezeiten können sowohl der Bestand und die Durchlaufzeit, als auch eine zu frühe Fertigstellung (Termintreue) minimiert werden, welche wiederum Bestand im Fertigwarenlager zur Folge hätte. Die Auslastung einzelner Maschinen wird über eine Minimierung der Leerzeiten erreicht. Da dem kombinatorischen Optimierungsproblem eine fixe Menge an Aufträgen als Eingangsgröße zur Verfügung steht und alle Aufträge eingeplant werden müssen, ist die Gesamtauslastung der Fertigung (mit allen enthaltenen Maschinen) konstant. Durch eine Minimierung der Leerzeiten kann aber erreicht werden, dass Maschinen mit einem geringeren Maschinenstundensatz höher ausgelastet werden, als Maschinen mit einem höheren Maschinenstundensatz. Hierfür muss die Bearbeitung von Arbeitsgängen der betrachteten Aufträge auf mehreren Maschinen möglich sein, wobei die dafür in Betracht kommenden Maschinen technologisch ähnlich sein müssen. Diese Maschinen können sich aber dennoch hinsichtlich ihrer Maschinenstundensätze unterscheiden (Unterschiede bspw. bei Alter und Wirkungsgrad). Die Minimierung der Lastspitze erfolgt über die Nivellierung der benötigten Leistung aller Maschinen im betrachteten Planungshorizont. Hierdurch kann der Leistungspreisanteil der Energiekosten reduziert werden, wobei der absolute Energieverbrauch konstant bleibt.

Die Minimierung des Bestands in der Fertigung, der Durchlaufzeit und der zu frühen Fertigstellung eines Auftrags (Termintreue) und der Leerzeiten wird in der Zielfunktion des Optimierungsproblems zusammen mit der Minimierung der Lastspitze verortet.

Die Einhaltung der Termintreue (in Form einer zu späten Fertigstellung) wird in dem kombinatorischen Optimierungsmodell garantiert. Dazu wird die Termintreue nicht in die Zielfunktion integriert, sondern deren Einhaltung in einer Nebenbedingung gefordert. Somit kann nur ein zulässiger Belegungsplan entstehen, wenn die Fertigstellungstermine aller Aufträge eingehalten werden. Diese Maßnahme erfolgte auf dem Ergebnis einer durchgeführten Studie, in welcher die Priorisierung der logistischen Zielgrößen erhoben wurde. Für die Studie wurden 80 Unternehmen angeschrieben. Die Auswahl der Unternehmen wurde, zur Absicherung der Allgemeingültigkeit der Ergebnisse, branchenübergreifend durchgeführt. Dabei hat sich eine Rückläuferquote von ca. 19 % eingestellt. Die Auswertung ergab, dass alle an der Studie teilgenommenen Unternehmen die Termintreue als wichtigste logistische Zielgröße bewerten (siehe Abbildung 6).

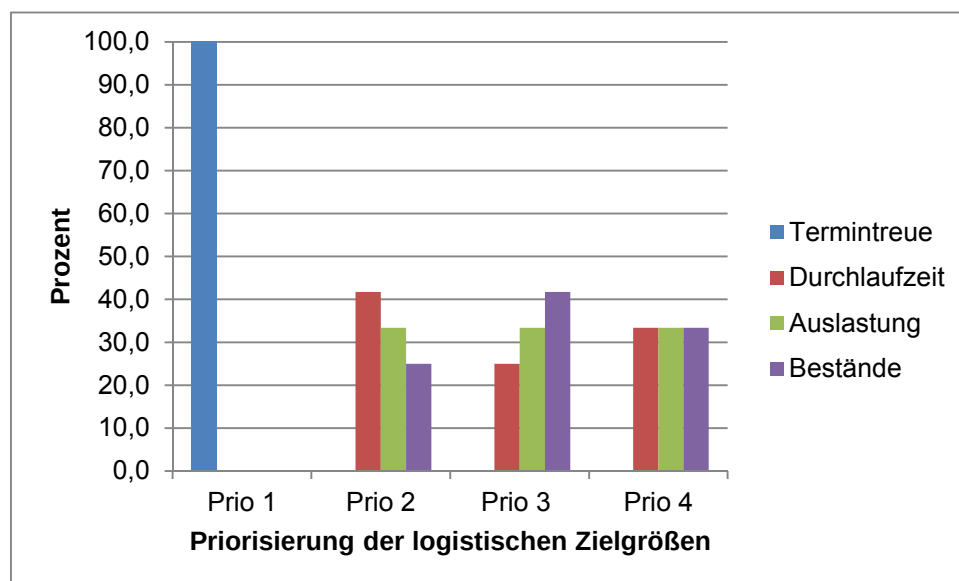


Abbildung 6: Ergebnisse der Studie zur Priorisierung der logistischen Zielgrößen

Damit das kombinatorische Optimierungsproblem unterschiedliche Belegungspläne bewerten und den optimalen Belegungsplan identifizieren kann, müssen die logistischen Zielgrößen sowie die Lastspitze mit Kostengrößen bewertet werden. Hierzu wurde ein Kostenmodell erarbeitet. Wie bereits herausgearbeitet wurde, können mit der Minimierung der Wartezeiten die Zielgrößen Bestand, Durchlaufzeit und Termintreue (zu frühe Fertigstellung) optimiert werden. Die monetäre Bewertung der Wartezeiten erfolgt durch Kapitalbindungskosten, welche pro Zeiteinheit anfallen. Diese

Kosten müssen nach jedem Arbeitsgang eines Auftrags zur Verfügung stehen. Die Kapitalbindungskosten setzen sich aus den Zinsen der bis inklusive des aktuellen Arbeitsgangs angefallenen Herstellkosten des Auftrags zusammen und fallen für Bestand pro Planungsperiode an. Die Herstellkosten setzen sich wiederum aus den aufsummierten Materialkosten (aus der Stückliste), Maschinenkosten (Maschinenstundensatz) und Lohnkosten (Lohnkostensatz) zusammen. Für die Bewertung der Auslastung werden Leerzeitkosten angesetzt. Diese ergeben sich ebenfalls aus Maschinenstundensätzen. Da eine Überschreitung des Liefertermins nicht zugelassen wird, entfällt eine Kostengröße zur Bewertung der Liefertreue (zu späte Fertigstellung). Die identifizierte Lastspitze eines Belegungsplans wird wie in Kapitel 4.1 beschrieben mit dem Leistungspreis multipliziert, um die Energiekosten zu erhalten. Die Gesamtkosten eines Belegungsplans ergeben sich aus den Logistikkosten und den Energiekosten. Die identifizierten Kostengrößen werden in die Zielfunktion integriert, wodurch ein monetärer Vergleich unterschiedlicher Belegungspläne innerhalb des Optimierungsproblems möglich wird.

4.2.3 Einführung von Energiephasen

Damit das Optimierungsproblem die Lastspitze minimieren kann, müssen den Arbeitsgängen der Fertigungsaufträge Energieverbräuche zugeordnet werden. Da der Energieverbrauch bei der Bearbeitung eines Arbeitsgangs in der Regel nicht konstant ist, müssen einem Arbeitsgang mehrere Energieverbrauchswerte zugeordnet werden. Bei der Erstellung und auch bei der Implementierung des Optimierungsproblems mit der Software GAMS ließ sich dies aber nicht modellieren. Einem Arbeitsgang konnte über eine logische Zuordnung nur ein Energieverbrauchswert zugeordnet werden. Mit gängigen Modellierungstechniken war dieses Problem nicht lösbar. Daher wurde eine alternative Vorgehensweise gewählt, die in der Einführung von Energiephasen bestand. Ein Arbeitsgang besteht aus mindestens einer Energiephase. Die maximale Anzahl von Energiephasen pro Arbeitsgang ergibt sich aus der Anzahl der Planungsperioden, die zur Bearbeitung des Arbeitsgangs benötigt werden. Eine Energiephase kann daher nicht weniger als eine Planungsperiode umfassen, wodurch wiederum einer Planungsperiode nicht mehr als ein Energieverbrauchswert zugeordnet werden kann. Innerhalb einer Energiephase ist der Energieverbrauch einer Maschine bei der Bearbeitung eines Fertigungsauftrags konstant, sodass pro Energiephase nur ein Energieverbrauchswert zu hinterlegen ist (siehe Abbildung 7). Dieser wird durch Mittelwertbildung ermittelt. Die Bestimmung der Energiephasen eines Arbeitsgangs wird im Rahmen der Validierung mit Realdaten in Kapitel 4.4.3 dargestellt. Die Einplanung innerhalb des Optimierungsproblems beruht damit letztendlich nicht mehr auf Arbeitsgängen sondern auf Energiephasen.

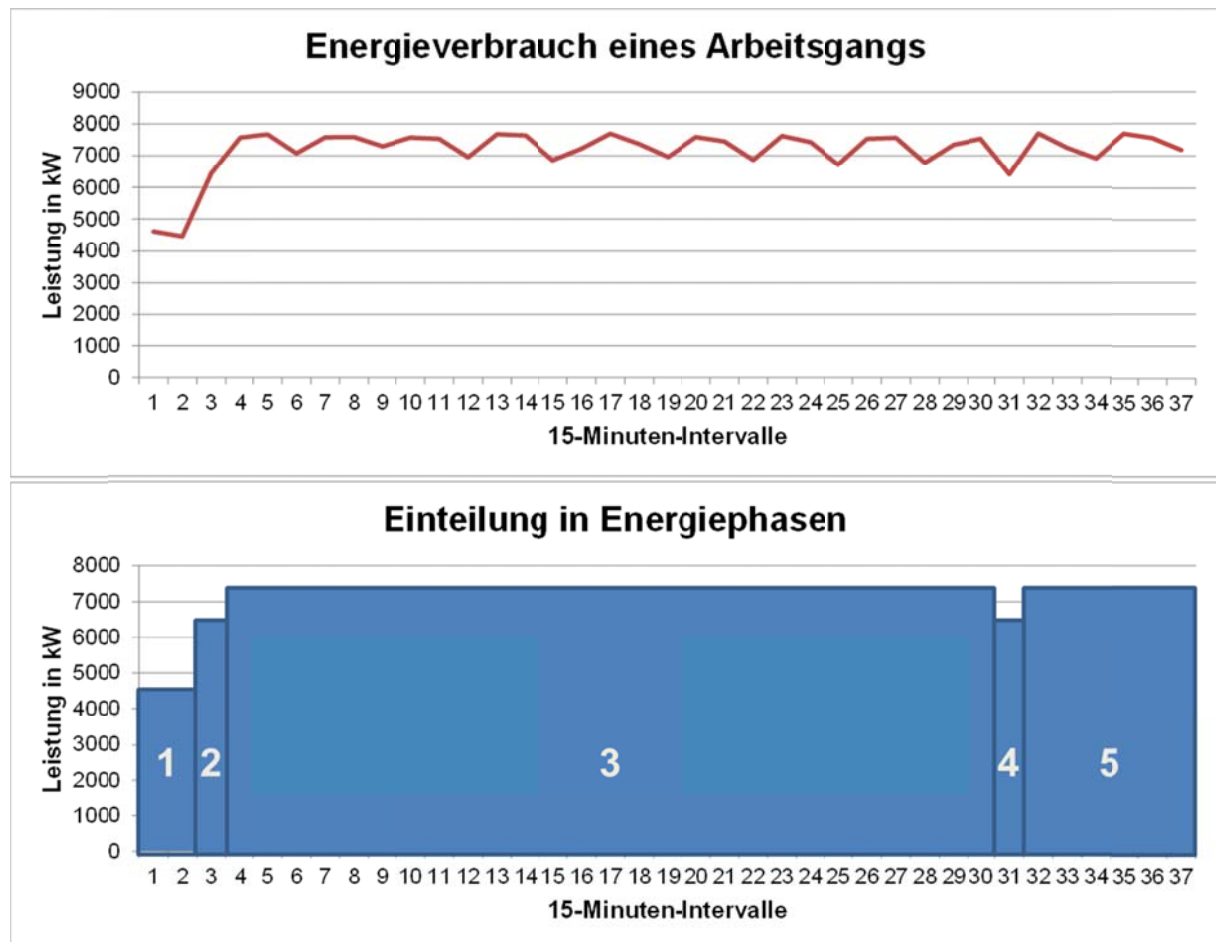


Abbildung 7: Einführung von Energiephasen

Für das Optimierungsproblem sind nun in Abhängigkeit der Länge des Planungshorizonts und der zur Verfügung stehenden Energieverbrauchsdaten zwei geeignete Zeitskalen zu wählen. Die erste Zeitskala entscheidet über die Länge einer Planungsperiode. Dabei steigt die Komplexität und auch die Rechenzeit bei der Lösung eines Optimierungsproblems, je größer die Anzahl der betrachteten Planungsperioden ist. Je kürzer nun die Länge einer Planungsperiode ist, umso mehr Planungsperioden werden zu Abbildung eines festgelegten Planungshorizonts benötigt. Pro Planungsperiode steht ein Energieverbrauchswert zur Verfügung. Dies bedeutet aber auch, dass je größer die Länge einer Planungsperiode ist, der Fehler, der bei der Bestimmung der korrekten Lastspitze entsteht, immer weiter zunimmt (vgl. Kapitel 4.1.1). Hier ist ein geeigneter Kompromiss zu finden, der sich an dem charakteristischen Energieverbrauchsverlauf der bei der Belegungsplanung betrachteten Maschinen orientieren kann. Unterliegt dieser nur geringen Schwankungen, kann eine größere Periodenlänge gewählt werden, als im Fall hoher Schwankungen.

Die zweite Zeitskala legt die Länge einer Messperiode fest und entscheidet in welchem Intervall die aktuelle Leistung in Form einer Mittelwertbildung bestimmt wird. Die Messperiode beträgt bei den Energieversorgern, wie in Kapitel 4.1.1 dargestellt,

15 Minuten. Für eine einheitliche Berechnungsgrundlage wird daher auch innerhalb des Optimierungsproblems diese Messperiodenlänge angenommen. Die Länge einer Planungsperiode sollte ein ganzzahliger Teiler der Messperiode sein und darf die Länge der Messperiode nicht übersteigen. Bei einer angenommenen Periodenlänge von 5 Minuten müssen nun die Energieverbräuche von drei Planungsperioden zusammengefasst werden, um die Messperiode (15 Minuten Intervall) mit der höchsten Leistung bestimmen und darüber den Leistungspreisanteil des Belegungsplans errechnen zu können.

4.2.4 Formulierung des kombinatorischen Optimierungsproblems

Nachfolgend wurde das entstandene kombinatorische Optimierungsproblem „Energy-Costs-saving-flexible-Job-Shop-Scheduling-Problem“ (Ecs-fjssp) mathematisch formuliert. Dafür wurden zunächst logische Restriktionen identifiziert, die bei der Erstellung eines zulässigen Belegungsplans einzuhalten sind:

- Alle Fertigungsaufträge mit den zugehörigen Arbeitsgängen müssen innerhalb des Planungshorizonts vollständig bearbeitet werden
- Die Bearbeitung eines Arbeitsgangs darf nicht unterbrochen werden
- Die durch die Fertigungsaufträge beanspruchte Kapazität darf die zur Verfügung stehende Kapazität aller Maschinen innerhalb des Planungshorizonts nicht übersteigen
- Die Bearbeitungsreihenfolge der Arbeitsgänge jedes Auftrags muss eingehalten werden
- Mehrere Arbeitsgänge eines Fertigungsauftrags dürfen nicht parallel auf verschiedenen Maschinen bearbeitet werden
- Die Bearbeitung eines Arbeitsgangs darf nur auf einer zulässigen Maschine erfolgen
- Jeder Arbeitsgang muss mindestens einer Maschine zugeordnet sein
- Innerhalb einer Planungsperiode darf auf einer Maschine nur ein Fertigungsauftrag / Arbeitsgang bearbeitet werden
- Jede Maschine steht in jeder Planungsperiode des Planungshorizonts zur Verfügung
- Die Bearbeitungszeit eines Arbeitsgangs ist für jede zulässige Maschine identisch

Folgende weitere Restriktionen sind durch die Einführung der Energiephasen bei der Erstellung eines Belegungsplans zu beachten:

- Energiephasen eines Arbeitsgangs dürfen nur ohne zeitliche Unterbrechung eingeplant werden
- Energiephasen eines Arbeitsgangs dürfen nur auf einer Maschine eingeplant werden

- Die Reihenfolge der Energiephasen eines Arbeitsgangs muss eingehalten werden

Wie aus den Restriktionen ersichtlich ist, wird im Sinne einer Werkstattfertigung von Freiheitsgraden bei der Auswahl einer Maschine für einen Fertigungsauftrag ausgegangen. Es wird weiterhin angenommen, dass sich bei der Bearbeitung eines Auftrags auf zwei ähnlichen, für die Bearbeitung geeigneten Maschinen, ein nahezu gleicher Energieverbrauch einstellt. Somit ist sowohl die Bearbeitungszeit als auch der Energieverbrauch eines Fertigungsauftrags als maschinenunabhängig anzusehen. Diese Annahme stützt sich auf Aussagen des PA. Als grundlegende energetische Voraussetzung für die Anwendung der Methode zur energiekostenorientierten Belegungsplanung müssen verschiedene Fertigungsaufträge zu unterschiedlichen Energieverbräuchen auf einer Maschine führen, sonst ist die Reihenfolge, in der die Aufträge von der Methode angeordnet werden aus energiekostenorientierter Sicht beliebig. Mit der in Kapitel 4.2.2 erfolgten inhaltlichen Entwicklung der Zielfunktion und den als Basis für die Nebenbedingungen dienenden Restriktionen erfolgte nun die mathematische Formulierung des Ecs-fjssp:

Indizes

$i = 1, \dots, I$	Aufträge
$j = 1, \dots, J$	Arbeitsgänge von Auftrag i
$s = 1, \dots, S$	Energiephasen des Arbeitsgangs j von Auftrag i
$k = 1, \dots, K$	Maschinen
$t, \tau = 1, \dots, T$	Planungsperioden ($T = \max \{d_i\}$)

Mengen

AA_i	Menge aller Arbeitsgänge j eines Auftrags i
PA_{ij}	Menge aller Energiephasen s eines Arbeitsgangs j von einem Auftrag i

Parameter

Anz_i	Anzahl der Arbeitsgänge eines Auftrags i
d_i	Fertigstellungstermin von Auftrag i
$e_{i,s}$	Energieverbrauch der Energiephase s eines Auftrags i
E_Grenz	Lastspitze eines früheren Belegungsplans in W
ϵ	Sehr kleine Zahl
$p_{i,s}$	Bearbeitungszeit von Energiephase s des Auftrags i

$kb_{i,j}$	Kapitalbindungskosten nach dem Arbeitsgang j des Auftrags i bearbeitet wurde pro Zeiteinheit
kb_roh_i	Kapitalbindungskosten bevor mit der Bearbeitung eines Auftrags i begonnen wird
LP	Leistungspreis pro W
$m_{i,j,k}$	= 1, wenn Arbeitsgang j eines Auftrags i auf Maschine k bearbeitet werden kann; = 0, sonst
mks_k	Maschinenkostensatz pro Planungsperiode für Maschine k
mp_laenge	Länge einer Messperiode in Minuten
s_max_{ij}	Letzte zugeordnete Energiephase s eines Arbeitsgangs j von Auftrag i
s_min_{ij}	Erste zugeordnete Energiephase s eines Arbeitsgangs j von Auftrag i
t_laenge	Länge einer Planungsperiode t in Minuten
teiler	Anzahl der zu mittelnden Planungsperioden t pro Messperiode (teiler = mp_laenge / t_laenge)

Variablen

$x_{i,j,s,k,t}$	= 1, wenn Energiephase s des Arbeitsgangs j des Auftrags i in Planungsperiode t auf Maschine k bearbeitet wird; = 0, sonst
$\gamma_{i,j,s,k}$	= 1, wenn Energiephase s des Arbeitsgangs j von Auftrag i auf Maschine k eingeplant ist; = 0, sonst
$Y_{e_{i,j,s,k,t}}$	= 1, wenn Energiephase s des Arbeitsgangs j des Auftrags i in der Planungsperiode t auf Maschine k endet; = 0, sonst
$Y_{s_{i,j,s,k,t}}$	= 1, wenn Energiephase s des Arbeitsgangs j des Auftrags i in der Planungsperiode t auf Maschine k beginnt; = 0, sonst
E_Wert_t	über alle Maschinen kumulierter Energiewert in Planungsperiode t
E_max	Maximaler Leistungswert des Belegungsplans in W
E_Zusatz	Differenz zwischen maximalem Leistungswert (E_max) des Belegungsplanes und den bis dahin maximalem Leistungswert E_Grenz eines vorherigen Belegungsplanes.
$ts_s_{i,j,s}$	Startzeitpunkt der Energiephase s des Arbeitsgangs j des Auftrags i
$te_s_{i,j,s}$	Endzeitpunkt der Energiephase s des Arbeitsgangs j des Auftrags i
$ts_j_{i,j}$	Startzeitpunkt des Arbeitsgangs j des Auftrags i
$te_j_{i,j}$	Endzeitpunkt des Arbeitsgangs j des Auftrags i

Zielfunktion

Die Zielfunktion (Gleichung 1) fordert die Minimierung von Energiekosten und Logistikkosten, wobei die erste Zeile der Gleichung die Energiekosten betrifft (energetische Zielfunktion) und die nächsten vier Zeilen der Zielfunktion die Logistikkosten betreffen (logistische Zielfunktion). Da die Zielfunktion zwei Zielgrößen (Energiekosten und Logistikkosten) enthält, handelt es sich hierbei um eine multikriterielle Optimierung. Die Minimierung von zwei Zielgrößen führt nicht zu einer Minimierung beider Zielgrößen einzeln, sondern zu einem gemeinsamen Minimum. Dabei können die beiden Zielgrößen über Gewichtungsfaktoren zusammen minimiert werden. Im vorliegenden Optimierungsproblem stellen die Gewichtungsfaktoren Kostengrößen dar. Im betrachteten Fall wirken die beiden Zielgrößen (Energiekosten und Logistikkosten) sich entgegen. Bei einer Minimierung von nur einer der beiden Zielgrößen könnte diese einen geringeren Wert annehmen, als sie bei der kombinierten Minimierung annimmt. Werden die Energiekosten erhöht, reduzieren sich bis zu einem gewissen Punkt die Logistikkosten und umgekehrt.

$$\text{Min } Z = E_Zusatz \times LP$$

$$\begin{aligned} & + \sum_k mks_k \times \left(T - \sum_i \sum_{j=1}^{Anz_i} \sum_{s=s_min_{i,j}}^{s_max_{i,j}} \sum_t x_{i,j,s,k,t} \right) \\ & + \sum_i \sum_{j=1}^1 (ts_j_{i,j} - 1) \times kb_roh_i \\ & + \sum_i \sum_{j=1}^{Anz_i-1} (ts_j_{i,j+1} - te_j_{i,j} - 1) \times kb_{i,j} \\ & + \sum_i \sum_{j=Anz_i}^{Anz_i} (d_i - te_j_{i,j}) \times kb_{i,j} \end{aligned} \quad (\text{Gleichung 1})$$

Die logistische Zielfunktion teilt sich in vier Teile auf. In der zweiten Zeile der Zielfunktion erfolgt, als Pendant zu einer maximierenden Kapazitätsauslastung, die Minimierung der Maschinenleerzeiten durch eine Multiplikation mit den Maschinenkosten pro Planungsperiode. Der Zeitraum zwischen dem Beginn des Planungshorizonts und dem Bearbeitungsbeginn eines Arbeitsganges multipliziert mit dem entsprechenden Kapitalbindungskostensatz entspricht der Minimierung von Lagerbeständen im Rohteilelager und wird durch die dritte Zeile der Zielfunktion beschrieben. Der Kapitalbindungskostensatz kb_roh_i enthält dabei nur die Zinsen für die Materialkosten, da noch keine Lohn- und Maschinenkosten durch eine Bearbeitung angefallen sind. Vom Starttermin des ersten Arbeitsganges wird „-1“ subtrahiert, weil die Planungszeit bei Planungsperiode $t = 1$ beginnt. Die Minimierung von Zwischenlagerbeständen als die Zeitspanne zwischen dem Start eines nachfolgenden und Ende eines vorherigen Arbeitsganges multipliziert mit dem entsprechenden Kapitalbindungskostensatz wird durch die vierte Zeile der Zielfunktion sichergestellt. Der Kapitalbindungskostensatz $kb_{i,j}$ umfasst dabei nun die bis inklusive des aktuellen Arbeitsganges angefallenen Zinsen für die Herstellkosten. Die Berücksichtigung von zu mi-

minimierenden Terminunterschreitungskosten ist Aufgabe der fünften Zeile der Zielfunktion. Dabei werden die Kapitalbindungskosten des gesamten Fertigungsauftrags mit dem Zeitraum zwischen der vollständigen Fertigstellung des Fertigungsauftrags, welche gleichbedeutend mit der Fertigstellung des letzten Arbeitsgangs des Auftrags ist, und dem Fertigstellungstermin d_i des Auftrags multipliziert. Da die Länge des Planungshorizonts auf dem spätesten Fertigstellungstermin $\max \{d_i\}$ basiert, liegen die Fertigstellungstermine aller Aufträge innerhalb des Planungshorizonts.

Energetische Nebenbedingungen

$$E_Wert_t = \sum_i \sum_j \sum_s \sum_k e_{i,s} \times x_{i,j,s,k,t} \quad \forall t \in T \quad (\text{Gleichung 2})$$

$$E_max \leq E_Grenz + E_Zusatz \quad (\text{Gleichung 3})$$

$$E_max = \max\{E_Wert_t\} \quad (\text{Gleichung 4})$$

Die energetische Zielfunktion minimiert das Produkt aus dem für den Belegungsplan relevanten Anteil der Lastspitze E_Zusatz und dem Leistungspreis. Dieser relevante Anteil der Lastspitze ergibt sich aus Gleichung 3, in der der für den betrachteten Belegungsplan maximale Leistungswert E_max (die Lastspitze) aufgeteilt wird, in die in der Zielfunktion verwendeten Variablen E_Zusatz und einer aus einem vorherigen Belegungsplan bereits entstandenen Lastspitze E_Grenz . Der für den aktuellen Belegungsplan relevante Anteil der Lastspitze E_Zusatz ergibt sich nun aus der Differenz zwischen E_max und E_Grenz . Besitzt der Parameter E_Grenz einen beispielhaften Wert von 60 kW, so entstehen durch einen zu erstellenden Belegungsplan, dessen maximale Leistung E_max unterhalb von 60 kW bleiben, keine Energiekosten. In diesem Fall werden bei der Optimierung nur die Logistikkosten minimiert. Bei einem Wert von 70 kW für E_max werden folglich nur 10 kW in der Zielfunktion berücksichtigt. Gleichung 2 summiert in der Variablen E_Wert_t für jede Planungsperiode die Energieverbräuche der Energiephasen der in dieser Planungsperiode auf allen Maschinen laufenden Arbeitsgänge auf. Das Auftragen dieser Variable über der Zeit ergibt den Energieverbrauchsverlauf der Fertigung. In Gleichung 4 wird aus den in Gleichung 3 ermittelten Gesamtenergieverbräuchen für jede Planungsperiode (in Variable E_Wert_t gespeichert), der maximale Leistungswert E_max ausgewählt. Gleichung 4 beinhaltet dazu eine „max“-Funktion. Hierdurch handelt es sich bei dem betrachteten Optimierungsproblem um ein nichtlineares Problem mit einer nicht stetig, differenzierbaren Funktion (DNLP) [Mac02]. Probleme dieser Klasse sind erheblich schwieriger zu lösen als stetige Problemstellungen, weshalb zur Lösung eines DNLP-Problems eine Umformulierung in ein äquivalentes nichtlineares Problem (NLP) vorgenommen werden muss. In einem solchen NLP-

Problem sind Funktionen wie min, max oder die Betragsfunktion verboten und daher leichter zu lösen als DNLP-Probleme. Deshalb wurde die max-Funktion approximiert und Gleichung 4 durch Gleichung 4a ersetzt.

$$E_max \geq \left(\frac{\sum_{\tau=t}^{\tau=t+teiler} E_Wert_{\tau}}{teiler} \right) + \left(\frac{\sum_{\tau=t+1}^{\tau=t+1+teiler} E_Wert_{\tau}}{teiler} \right) + \frac{\sqrt{\left(\left(\frac{\sum_{\tau=t}^{\tau=t+teiler} E_Wert_{\tau}}{teiler} \right) - \left(\frac{\sum_{\tau=t+1}^{\tau=t+1+teiler} E_Wert_{\tau}}{teiler} \right) \right)^2 + \epsilon^2}}{2} \quad \forall t \leq T - (teiler - 1) \quad (\text{Gleichung 4a})$$

Gleichung 4a sorgt gleichermaßen wie Gleichung 4 für die Bestimmung des maximalen Leistungswerts innerhalb des Planungshorizonts, benötigt hierfür aber keine „max“-Funktion und ist von der Konzeption als die „Chen-Harker-Kanzow-Smale-Funktion“ bekannt. Die Grundvorgehensweise basiert auf dem Vergleich von zwei Leistungswerten zweier nachfolgender Messperioden (15 Minuten Intervalle). Beim Vergleich von E_Wert_t mit E_Wert_{t+1} ergibt Gleichung 4a als Ergebnis den größeren der beiden Werte, welcher als momentanes Maximum E_max angenommen wird. Es erfolgt eine paarweise Betrachtung aller Messperioden, wodurch letztlich der maximale Leistungswert bestimmt wird. Je nach Länge einer Planungsperiode t_laenge sind unterschiedlich viele Planungsperioden und somit auch Leistungswerte pro Messperiode zu berücksichtigen und zusammenzufassen. Die Anzahl der zu berücksichtigen Planungsperioden und Leistungswerte pro Messperiode ergibt sich aus dem Wert des Parameters $teiler$, welcher sich aus dem Quotienten der Länge einer Messperiode $mp_laenge = 15$ Minuten und der Länge einer Planungsperiode t_laenge ergibt.

Logistische Nebenbedingungen

Die im Folgenden beschriebenen Nebenbedingungen gelten immer für bestimmte Mengen. Eine Gleichung kann dabei für jeden Auftrag ($\forall i \in I$), für jede Maschine ($\forall k \in K$), für jede Planungsperiode ($\forall t \in T$), für jeden Arbeitsgang eines Auftrags ($\forall j \in AA_i$) oder für jede Energiephase eines Arbeitsgangs ($\forall s \in PA_i$) gelten. Gilt eine Gleichung bspw. für alle Aufträge und es existieren zehn Aufträge, so entstehen daraus auch zehn Gleichungen.

$$ts_{s_{i,j,s}} + p_{i,s} = ts_{s_{i,j,s+1}} \quad \forall i \in I, j \in AA_i, s \in PA_{i,j} \quad (\text{Gleichung 5})$$

$$gamma_{i,j,s,k} = gamma_{i,j,s+1,k} \quad \forall i \in I, j \in AA_i, s \in PA_{i,j}, k \in K \quad (\text{Gleichung 6})$$

$$\sum_k \gamma_{i,j,s,k} = 1 \quad \forall i \in I, j \in AA_i, s \in PA_{i,j} \quad (\text{Gleichung 7})$$

$$\sum_t x_{i,j,s,k,t} = \gamma_{i,j,s,k} \times p_{i,s} \quad \forall i \in I, j \in AA_i, s \in PA_{i,j}, k \in K \quad (\text{Gleichung 8})$$

Die Gleichungen 5 bis 8 beziehen sich auf die korrekte Einplanung der Energiephasen. Gleichung 7 bewirkt, dass jede Energiephase eines Arbeitsgangs eines bestimmten Auftrags genau einmal eingeplant wird, wodurch die Binärvariable $\gamma_{i,j,s,k}$ auf den Wert „1“ gesetzt wird. Somit wird einerseits verhindert, dass eine Energiephase mehreren Maschinen zugeordnet werden kann und gleichzeitig sichergestellt, dass alle Energiephasen im Planungshorizont eingeplant werden. Gleichung 6 führt dazu, dass alle Energiephasen, die zu einem Arbeitsgang gehören auf nur einer Maschine eingeplant werden. Dazu fordert Gleichung 6, dass die Variable $\gamma_{i,j,s+1,k}$ einer nachfolgenden Energiephase eines Arbeitsgangs auf den Wert „1“ gesetzt wird, wenn die Variable $\gamma_{i,j,s,k}$ der vorherigen Energiephase desselben Arbeitsgangs den Wert „1“ besitzt. Gleichung 5 garantiert, dass alle Energiephase eines Auftrags ohne zeitliche Unterbrechung hintereinander eingeplant werden. Dazu fordert Gleichung 5, dass der Startzeitpunkt einer nachfolgenden Energiephase eines Arbeitsgangs exakt dem Startzeitpunkt der vorherigen Energiephase desselben Arbeitsgangs plus der Bearbeitungszeit dieser Energiephase entspricht. Gleichung 8 stellt die Verknüpfung zwischen der periodenlosgelösten Energiephasenbetrachtung und der grundlegenden binären Entscheidungsvariable des Optimierungsproblems $x_{i,j,s,k,t}$ dar. $x_{i,j,s,k,t}$ besitzt den Wert „1“, wenn die Energiephase eines Arbeitsgangs eines bestimmten Auftrags in einer Planungsperiode auf einer Maschine bearbeitet wird. Diese Variable sorgt also für eine konkrete zeitliche Einplanung auf einer Maschine. Dazu wird in Gleichung 8 die Variable $\gamma_{i,j,s,k}$ mit der Bearbeitungszeit der zugehörigen Energiephase multipliziert, um im Belegungsplan über die Variable $x_{i,j,s,k,t}$ entsprechend viele Planungsperioden mit der Energiephase zu belegen.

$$ts_{j,i,j} + \sum_{s=s_{\min i,j}}^{s_{\max i,j}} p_{i,s} \leq ts_{j,i,j+1} \quad \forall i \in I, j \in AA_i \quad (\text{Gleichung 9})$$

$$te_{j,i,j} - ts_{j,i,j} + 1 = \sum_{s=s_{\min i,j}}^{s_{\max i,j}} p_{i,s} \quad \forall i \in I, j \in AA_i \quad (\text{Gleichung 10})$$

$$ts_{j,i,j} = ts_{i,j,s} \quad \forall i \in I, j \in AA_i, s \in s_{\min i,j} \quad (\text{Gleichung 11})$$

$$te_{j,i,j} = te_{i,j,s} \quad \forall i \in I, j \in AA_i, s \in s_{\max i,j} \quad (\text{Gleichung 12})$$

$$(x_{i,j,s,k,t} - x_{i,j,s,k,t-1}) \leq Y_{i,j,s,k,t} \quad \forall i \in I, j \in AA_i, s \in PA_{i,j}, k \in K, t \in T \quad (\text{Gleichung 13})$$

$$(x_{i,j,s,k,t} - x_{i,j,s,k,t+1}) \leq Ye_{i,j,s,k,t} \quad \forall i \in I, j \in AA_i, s \in PA_{i,j}, k \in K, t \in T \quad (\text{Gleichung 14})$$

$$ts_{s_{i,j,s}} = \sum_k \sum_t Ys_{i,j,s,k,t} * t \quad \forall i \in I, j \in AA_i, s \in PA_{i,j} \quad (\text{Gleichung 15})$$

$$te_{s_{i,j,s}} = \sum_k \sum_t Ye_{i,j,s,k,t} * t \quad \forall i \in I, j \in AA_i, s \in PA_{i,j} \quad (\text{Gleichung 16})$$

$$\sum_k \sum_{t=1}^{d_i} Ye_{i,j,s,k,t} = 1 \quad \forall i \in I, j \in AA_i, s \in PA_{i,j} \quad (\text{Gleichung 17})$$

$$\sum_k \sum_t Ys_{i,j,s,k,t} = 1 \quad \forall i \in I, j \in AA_i, s \in PA_{i,j} \quad (\text{Gleichung 18})$$

Über die Gleichungen 9 bis 18 erfolgt die korrekte Einplanung der Arbeitsgänge. Die Gleichungen 13 und 14 identifizieren, wann eine Energiephase beginnt und wann sie endet. Dazu wird in Gleichung 13 die Binärvariable $Ys_{i,j,s,k,t}$ auf den Wert „1“ gesetzt, wenn in der entsprechenden Planungsperiode eine Energiephase beginnt. Dies ist der Fall, wenn die Variable $x_{i,j,s,k,t}$ den Wert „1“ aufweist und somit in der entsprechenden Planungsperiode eine Bearbeitung der Energiephase stattfindet und der Wert der Variable $x_{i,j,s,k,t-1}$ in der Vorperiode den Wert „0“ aufweist. Ähnlich verhält sich Gleichung 14. Hier wird die Binärvariable $Ye_{i,j,s,k,t}$ auf den Wert „1“ gesetzt, wenn in der entsprechenden Planungsperiode eine Energiephase endet. Dies ist der Fall, wenn die Variable $x_{i,j,s,k,t}$ den Wert „1“ aufweist und somit in der entsprechenden Planungsperiode eine Bearbeitung der Energiephase stattfindet und der Wert der Variable $x_{i,j,s,k,t+1}$ in der Folgeperiode den Wert „0“ aufweist. Um nun die konkreten Start- und Endzeitpunkte als Zahlenwerte zu erhalten, werden die beiden Variablen $Ys_{i,j,s,k,t}$ und $Ye_{i,j,s,k,t}$ in den Gleichungen 15 und 16 mit der aktuellen Planungsperiode multipliziert und ergeben somit den Startzeitpunkt $ts_{s_{i,j,s}}$ und den Endzeitpunkt $te_{s_{i,j,s}}$ der betrachteten Energiephase. Gleichung 18 garantiert, dass jede Energiephase innerhalb des Betrachtungshorizonts genau einmal gestartet wird. Gleichung 18 ähnelt Gleichung 7 mit dem Unterschied, dass nun ein zeitlicher Bezug hergestellt wird und der Start der Energiephase innerhalb des Betrachtungshorizonts erfolgen muss. Gleichung 17 garantiert die Einhaltung der Termintreue, in dem sie fordert, dass alle Energiephasen eines Arbeitsgangs von einem bestimmten Auftrag bis zum Fertigstellungstermin des Auftrags beendet worden sein müssen. Gleichung 9 stellt die Bearbeitungsreihenfolge der Arbeitsgänge sicher und verhindert eine Überschneidung bei der Einplanung. Somit kann ein nachfolgender Arbeitsgang erst gestartet werden, wenn der vorherige abgeschlossen ist. Dazu fordert Gleichung 9, dass der Startzeitpunkt $ts_{j_{i,j+1}}$ eines nachfolgenden Arbeitsgangs kleiner oder gleich dem Startzeitpunkt des aktuellen Arbeitsgangs plus der Bearbeitungszeit aller dem Ar-

beitsgang zugeordneten Energiephasen ist. Dabei wird über die Parameter $s_{min_{i,j}}$ und $s_{max_{i,j}}$ die erste und letzte zugeordnete Energiephase des Arbeitsgangs bestimmt und somit die aufzusummierenden Energiephasen ausgewählt. Aufgrund des kleiner-gleich-Operators können die verschiedenen Arbeitsgänge eines Auftrags mit zeitlichen Unterbrechungen zwischen den einzelnen Arbeitsgängen eingeplant werden. Gleichung 10 stellt sicher, dass der Abstand des Start- und Endzeitpunkts eines Arbeitsgangs so viele Planungsperioden beträgt, wie zur Bearbeitung aller Energiephasen dieses Arbeitsgangs benötigt werden. In den Gleichungen 11 und 12 werden aus den ermittelten Start- und Endzeitpunkten der Energiephasen die Start- und Endzeitpunkte der Arbeitsgänge bestimmt. Dabei stellt der Startzeitpunkt der ersten Energiephase eines Arbeitsgangs den Startzeitpunkt dieses Arbeitsgangs dar und der Endzeitpunkt der letzten Energiephase eines Arbeitsgangs stellt den Endzeitpunkt dieses Arbeitsgangs dar.

$$\sum_i \sum_{j=1}^{Anz_i} \sum_{s=s_{min_{i,j}}}^{s_{max_{i,j}}} x_{i,j,s,k,t} \leq 1 \quad \forall k \in K, t \in T \quad (\text{Gleichung 19})$$

$$x_{i,j,s,k,t} \leq m_{i,j,k} \quad \forall i \in I, j \in AA_i, s \in PA_{i,j}, k \in K, t \in T \quad (\text{Gleichung 20})$$

Die Gleichungen 19 bis 20 beziehen sich auf die Auswahl einer Maschine. Gleichung 19 bewirkt, dass auf jeder Maschine in jeder Planungsperiode höchstens eine Energiephase eines Arbeitsgangs von einem Auftrag bearbeitet werden darf. Somit können keine Mehrfachbelegungen entstehen. Mit Gleichung 20 wird sichergestellt, dass eine Energiephase eines Arbeitsgangs von einem Auftrag nur dann auf einer Maschine eingeplant werden kann, wenn diese Energiephase auch auf der entsprechenden Maschine bearbeitet werden darf. Besitzt der Parameter $m_{i,j,k}$ für die entsprechende Kombination von Auftrag, Arbeitsgang und Maschine den Wert „1“, so ist eine Einplanung technologisch möglich. Auf eine Unterscheidung nach Energiephasen kann hierbei verzichtet werden, da alle Energiephasen eines Arbeitsgangs auf derselben Maschine eingeplant werden müssen.

4.2.5 Kritische Diskussion

Nachfolgend wird darauf eingegangen, weshalb eine absolute Minimierung der durch die Belegungsplanung entstehenden Kosten im Abrechnungszeitraum eines Energietarifs (s. Kapitel 4.1) von der Methode zur energiekostenorientierten Belegungsplanung nicht geleistet werden kann. Der Planungshorizont eines Belegungsplans ist in der Regel kurzfristig und daher kleiner als der Abrechnungszeitraum für die Lastspitze (mindestens vierteljährig). Daher werden pro Abrechnungszeitraum mehrere Belegungspläne in einem Industrieunternehmen erstellt. Nun ist die höchste Lastspit-

ze aus allen Belegungsplänen im Abrechnungszeitraum maßgeblich für die Berechnung des Leistungspreisanteils in den Energiekosten. Die Methode kann Lastspitzen früherer Belegungspläne berücksichtigen, wobei in dem aktuellen Belegungsplan keine Energiekosten anfallen, solange sich die Lastspitze des aktuellen Belegungsplans unterhalb der höchsten Lastspitze der früheren Belegungspläne befindet (siehe Abbildung 8: Wochen X-1 und X). Die Lastspitzen späterer Belegungspläne können keine Berücksichtigung im aktuellen Belegungsplan finden. Es ist aber durchaus möglich, dass aufgrund besonders energieintensiver Fertigungsaufträge oder enger Lieferfristen in einem zukünftigen Belegungsplan des Abrechnungszeitraums eine höhere Lastspitze als im aktuellen Belegungsplan entsteht (siehe Abbildung 8: Wochen X und X+1). Immer dann, wenn in einem späteren Belegungsplan eine solche höhere Lastspitze als in den vorherigen Belegungsplänen anfällt, hätte in diesen unter Ausnutzung der Leistungsdifferenz zwischen der höheren Lastspitze des späteren Belegungsplans und der ermittelten Lastspitze des früheren Belegungsplans eine kostengünstigere Anordnung der Aufträge und Arbeitsgänge erfolgen können. Diese kostengünstigere Anordnung hätte zwar zu einer höheren Lastspitze im früheren Belegungsplan geführt, diese wäre aber in jedem Fall in dem späteren Belegungsplan erreicht worden. Somit wären in dem früheren Belegungsplan über den Abrechnungszeitraum gesehen keine zusätzlichen Energiekosten entstanden, aber in dem früheren Belegungsplan wäre eine Reduzierung der Logistikkosten möglich gewesen. Die Methode zur energiekostenorientierten Belegungsplanung kann dies nicht abbilden. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass der Energieversorger den Leistungspreisanteil über einen langen Zeitraum bestimmt. Eine Durchführung der Belegungsplanung bspw. für den Zeitraum eines Jahres mit der minutengenauen Festlegung von Startzeiten und Maschinenzuordnungen ist in der Industrie nicht realistisch. Die Methode ergibt also für einen konkreten Belegungsplan nicht den korrekten im Planungshorizont anfallenden Leistungskostenanteil, führt aber dennoch zu einer Nivellierung des Energieverbrauchsverlaufs und somit zu einer Reduzierung der Energiekosten unter den bei der Belegungsplanung aktuell zur Verfügung stehenden Informationen.

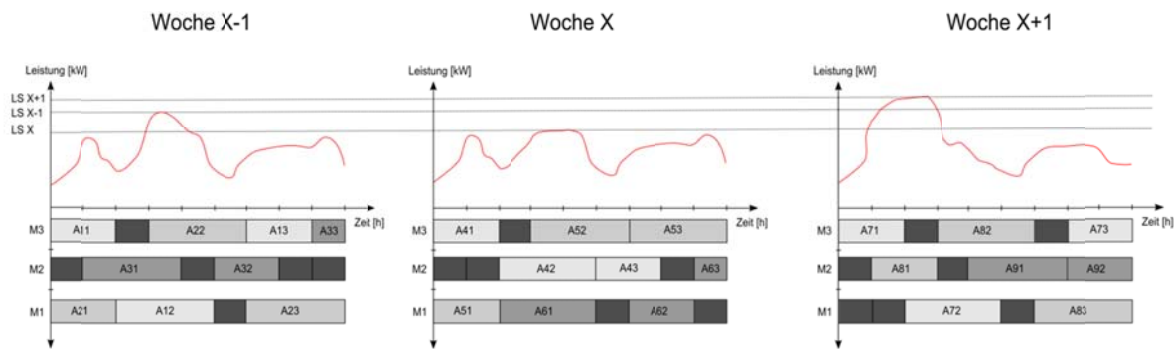


Abbildung 8: Beeinflussung der Belegungsplanung durch frühere/spätere Belegungspläne

4.3 Implementierung der Methode zur energiekostenorientierten Belegungsplanung

In diesem Kapitel wurde die in Kapitel 4.2 entwickelte Methode zur energiekostenorientierten Belegungsplanung implementiert und hinsichtlich ihrer Wirksamkeit geprüft. Für die Prüfung der Wirksamkeit des formulierten kombinatorischen Optimierungsproblems wurde dieses in Kapitel 4.3.1 zunächst in der Modellierungssprache GAMS umgesetzt und für kleine Probleminstanzen mittels eines exakten Verfahrens gelöst. Danach wurde die Methode zur energiekostenorientierten Belegungsplanung in Kapitel 4.3.2 auf Grundlage des kombinatorischen Optimierungsproblems zur aufwandsarmen Anwendung für KMU in Form eines hybriden genetischen Algorithmus umgesetzt.

4.3.1 Nachweis der Wirksamkeit des Ecs-fjssp

Nach der Erstellung der Methode zur energiekostenorientierten Belegungsplanung in Form des kombinatorischen Optimierungsproblems musste überprüft werden, ob die formulierten Nebenbedingungen vollständig sind und eingehalten werden. Weiterhin war zu prüfen, ob das kombinatorische Optimierungsproblem mit der entwickelten Zielfunktion die optimale Lösung einer Testinstanz und somit den kostenminimalen Belegungsplan finden kann. Dazu wurde das Ecs-fjssp in der Modellierungssprache GAMS implementiert und in iterativen Schritten angepasst, bis das Optimierungsproblem für eine einfache Testinstanz zu einer ersten Lösung führte. Zur Errechnung einer solchen Lösung wurde ein exaktes Verfahren verwendet, welches die Berechnung von optimalen Lösungen ermöglicht. Dabei handelte es sich um ein Branch-and-Bound-Verfahren mit LP-Relaxation, welches in dem Solver SCIP (Solving Constraint Integer Programs) programmiert ist. Dieser Solver ist für die Lösung von Problemen der Klasse minlp (mixed integer nonlinear programming) vorgesehen, dem das Ecs-fjssp zugeordnet werden kann. Danach wurden weitere Testinstanzen generiert, die sich in der Komplexität hinsichtlich des Planungshorizonts, der Anzahl an

Maschinen und Arbeitsgängen und der Fertigstellungszeitpunkte unterschieden. Anhand der errechneten Lösungen der Testinstanzen, wurden logische Fehler in der Modellformulierung identifiziert und beseitigt, sodass alle geforderten Restriktionen eingehalten werden. Für die Überprüfung, ob das Ecs-fjssc die optimale Lösung findet, wurde es für sehr kleine Testinstanzen gelöst. Die Komplexität dieser Testinstanzen war sehr gering (bspw. 2 Maschinen, 4 Aufträge, 5 Planungsperioden), sodass auch ohne technische Unterstützung alle Anordnungsmöglichkeiten (und somit auch die optimale Anordnungsmöglichkeit) identifiziert werden konnten. Da das verwendete Branch-and-Bound-Verfahren zu den exakten Verfahren gehört, ist zumindest für kleine Testinstanzen, das Finden der optimalen Lösung sichergestellt. Sollte das Ecs-fjssc eine durch den dargestellten Vergleich identifizierte, nichtoptimale Lösung ergeben, so war dies demnach auf die Formulierung des Optimierungsproblems zurückzuführen. Nach iterativen Anpassungsschritten konnte mittels des Optimierungsproblems die korrekte optimale Lösung gefunden werden. Hierdurch wurde die Wirksamkeit des kombinatorischen Optimierungsproblems bestätigt.

4.3.2 Entwicklung eines hybriden genetischen Algorithmus

Wie in Kapitel 4.2.1 dargestellt wurde, gehört das entwickelte Ecs-fjssp zu der Klasse der np-schweren Probleme [Hen02; Dem13]. Diese Probleme sind so komplex, dass für große Testinstanzen eine optimale Lösung unter Verwendung von exakten Verfahren nicht oder nur durch eine sehr lange Rechenzeit gefunden werden kann. Daher ist die Verwendung von exakten Verfahren, wie sie bspw. der Solver SCIP nutzt, zur Lösung des Ecs-fjssp nicht zielführend und genügt einer aufwandsarmen Anwendung für KMU nicht. Daher erfolgte die Programmierung eines heuristischen Lösungsalgorithmus. Eine Heuristik garantiert nicht das Finden der besten Lösung, ermöglicht aber Lösungen in der Nähe des Optimums. Dafür ist die benötigte Rechenzeit sehr kurz. Dies ist eine zentrale Anforderung für einen industriellen Einsatz der entwickelten Methode, welche durch die Verwendung eines heuristischen Lösungsansatzes erfüllt werden konnte. Im vorliegenden Forschungsvorhaben wurde ein hybrider genetischer Algorithmus programmiert. Dieser ist weitestgehend unabhängig von der betrachteten Problemklasse und eignet sich daher auch für die Lösung des Ecs-jssp. Die Umsetzung des HGA erfolgte in der Programmiersprache JAVA. Einem genetischen Algorithmus liegt kein Solver zugrunde. Die benötigte Intelligenz muss selbst hinterlegt werden. Nachfolgend wird die Funktionsweise des HGA beschrieben.

Ein genetischer Algorithmus orientiert sich am Vorbild des natürlichen Evolutionsprozesses [Nis97]. Dabei werden die Erbinformationen von zwei Individuen einer Generation bei der Fortpflanzung miteinander kombiniert und neu zusammengesetzt. Bei

der Fortpflanzung können hierdurch neue Erbinformationen bei den Nachkommen in der nächsten Generation auftreten. Nach Charles Darwins Theorie „Survival of the fittest“ dominieren diejenigen Individuen einer Population, welche sich am besten an die Umweltbedingungen anpassen können und erzeugen daher die größte Anzahl an Nachkommen, wodurch sie die nächste Generation maßgeblich beeinflussen. Auf diesem Prozess der „natürlichen Selektion“ basiert ein genetischer Algorithmus.

Der Aufbau und Ablauf des im Forschungsprojekt entwickelten hybriden genetischen Algorithmus kann Abbildung 9 entnommen werden. Zu Beginn wird zunächst eine Menge an Lösungen erstellt, welche die Startpopulation darstellen. Eine Lösung stellt dabei einen zulässigen, gegen keine in Kapitel 4.2.4 formulierte Nebenbedingung verstoßenden Belegungsplan dar und wird dabei als Individuum bezeichnet. Die Erbinformationen eines Individuums sind in einem zugehörigen Chromosom gespeichert. Die einzelnen Gene des Chromosoms repräsentieren dabei Entscheidungsvariablen in Anlehnung an das kombinatorische Optimierungsproblem aus Kapitel 4.2. Der konkrete Wert eines Gens, also der Wert einer Entscheidungsvariablen wird als Allel bezeichnet. Bei der Erstellung der Startpopulation wird noch nicht auf die Güte einer Lösung geachtet. Daraufhin werden die Individuen der Startpopulation mittels eines Selektionsverfahrens über eine Fitnessfunktion bewertet. Die Fitnessfunktion besteht aus der in Kapitel 4.2.4 beschriebenen Zielfunktion des kombinatorischen Optimierungsproblems. Die besten Individuen werden für den anschließenden evolutionären Prozess ausgewählt. Die ausgewählten Individuen, auch Elternchromosomen (E) genannt, werden im nächsten Schritt miteinander gekreuzt (Crossover), wodurch die Erbinformationen zweier Individuen miteinander vermischt werden. Des Weiteren erfolgt eine zufällige Veränderung der Allele des Chromosoms der Individuen (Mutation). Daraufhin erfolgt die Bewertung der entstandenen Kinderchromosomen (K) wiederum mit der Fitnessfunktion. Im Populationskonzept wird dann entschieden, in wie weit sich die Startpopulation durch die im evolutionären Prozess neu entstandenen Individuen verändert. Danach wird ein Abbruchkriterium geprüft, welches im vorliegenden HGA in Form einer maximalen Rechenzeit umgesetzt wurde. Solange dieses Abbruchkriterium nicht erfüllt ist, wird der evolutionäre Prozess fortgeführt. Die Hybridisierung des genetischen Algorithmus erfolgt durch die Integration von Reparaturverfahren und einer lokalen Suche. Die entsprechenden Bestandteile sind in Abbildung 9 mit einem Sternchen gekennzeichnet.

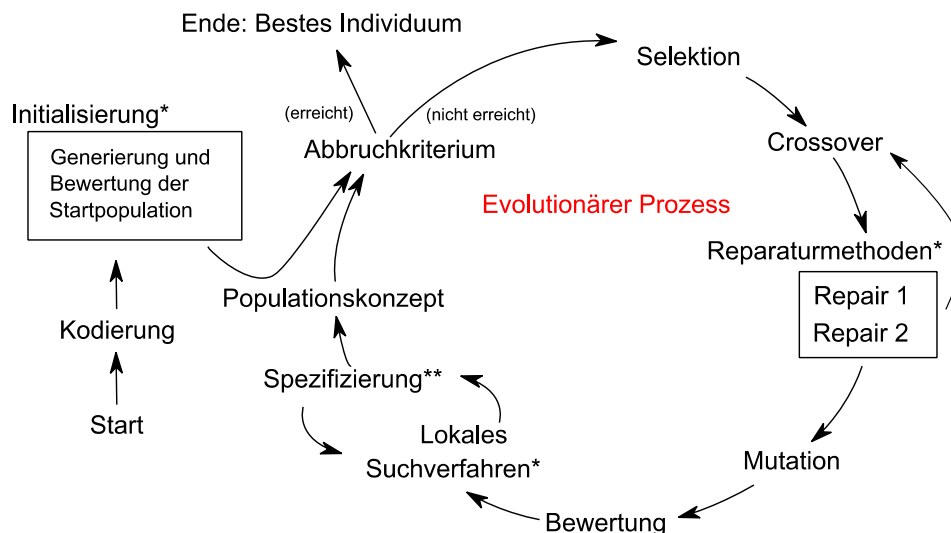


Abbildung 9: Aufbau des hybriden genetischen Algorithmus

Die weitere Beschreibung des HGA basiert auf einer beispielhaften Testinstanz von zwei Maschinen und zwei Aufträgen, mit jeweils zwei Arbeitsgängen, welche im Belegungsplan in Abbildung 10 nachvollzogen werden kann. Jeder Arbeitsgang kann auf beiden Maschinen bearbeitet werden. Der zweite Arbeitsgang des ersten Auftrags besitzt zwei Energiephasen. Alle anderen Arbeitsgänge besitzen eine Energiephase. Die Bearbeitungszeit einer Energiephase beträgt zwei Planungsperioden. Davon ausgenommen sind die jeweils letzten Energiephasen eines Auftrags (dritte Energiephase des ersten Auftrags und zweite Energiephase des zweiten Auftrags), bei denen die Bearbeitungszeit eine Planungsperiode beträgt. Es werden insgesamt sechs Planungsperioden betrachtet.

Kodierung

Nachdem der allgemeine Ablauf des HGA erläutert wurde, werden nun die einzelnen Schritte näher beschrieben. Zunächst muss die Möglichkeit geschaffen werden, dass der HGA einen Belegungsplan in Form eines Chromosoms abbilden kann. Hierzu wird eine Kodierung verwendet, die als Ansatz eine operation-based representation auf Basis einer Energiephasenbezogenen Permutation mit Wiederholung verwendet. Über die Kodierung kann eine Lösung des Planungsproblems (Belegungsplan) in die genetische Form eines Chromosoms übertragen werden (Phänotyp-Dekodierung). Ebenfalls kann die Übertragung der genetischen Informationen eines Chromosoms in eine Lösung des Planungsproblems (Belegungsplan) übertragen werden (Genotyp-Dekodierung). Das Chromosom, mit dem der genetische Algorithmus arbeitet, besteht aus vier Strings (Zeichenketten), die in Kombination alle Informationen einer Lösung des Planungsproblems beinhalten. Anhand von Abbildung 10 kann der Aufbau der Strings erläutert werden.

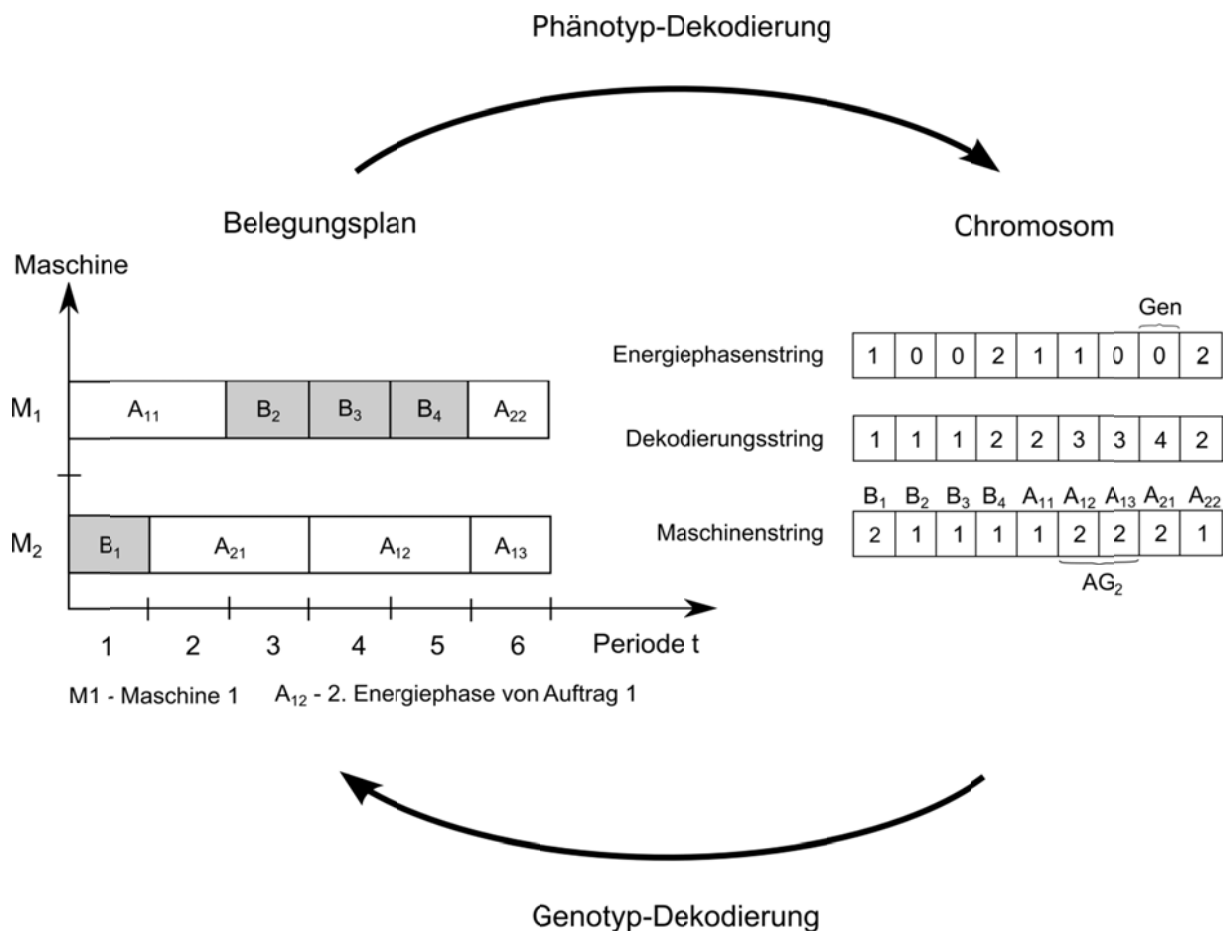


Abbildung 10: Kodierung eines Belegungsplans

Ein bestimmtes Gen des Energiephasenstrings repräsentiert eine Energiephase eines Auftrags. A₂₁ steht beispielsweise für die erste Energiephase s des zweiten Auftrags i (A_{is}). Eine Zahl im Energiephasenstring steht für den Auftragsindex. Die Anzahl der Energiephasen eines Auftrags bestimmt die Anzahl der Wiederholungen des Auftragsindex innerhalb des Energiephasenstrings. Die dritte „1“ im Energiephasenstring bezeichnet also bspw. die dritte Energiephase des ersten Auftrags. Diese Information wird an paralleler Stelle als Energiephasenindex im Dekodierungsstring gespeichert, welcher eine Hilfe für die Programmierung des HGA in JAVA darstellt. Die Reihenfolge des Energiephasenstrings ergibt sich erst bei der Kodierung selbst. Es gibt mehrere mögliche Reihenfolgen, die denselben Belegungsplan abbilden können. Leerzeiten innerhalb eines Belegungsplans werden über die Einführung von Leerzeitarbeitsgängen B_j innerhalb des Chromosoms berücksichtigt. Diese besitzen innerhalb des Energiephasenstring alle den Auftragsindex „0“, sowie eine Bearbeitungszeit von einer Planungsperiode. Daher ist der Anzahl der Arbeitsgänge immer gleich der Anzahl an Energiephasen und es kann eine Betrachtung der Leerzeiten auf der Ebene der Arbeitsgänge erfolgen. Im Dekodierungsstring wird der Energiephasen- bzw. in diesem Fall der Arbeitsgangindex der Leerzeitarbeitsgänge mit fortlaufender Nummerierung gespeichert. Im Maschinenstring ist die Information enthalten, auf welcher Maschine eine Energiephase eines Auftrags bzw. ein Leer-

zeitarbeitsgang angeordnet ist. Der Maschinenstrings ist immer in der dargestellten Reihenfolge nach dem aufsteigenden Index, beginnend mit den Leerzeitarbeitsgängen und gefolgt von den Energiephasen eines Auftrags, aufgebaut. Ein weiterer, nicht in Abbildung 10 enthaltener, Hilfsstring, welcher wie der Maschinenstring aufgebaut ist, speichert die Start- und Endzeitpunkte der Energiephasen.

Generierung der Startpopulation

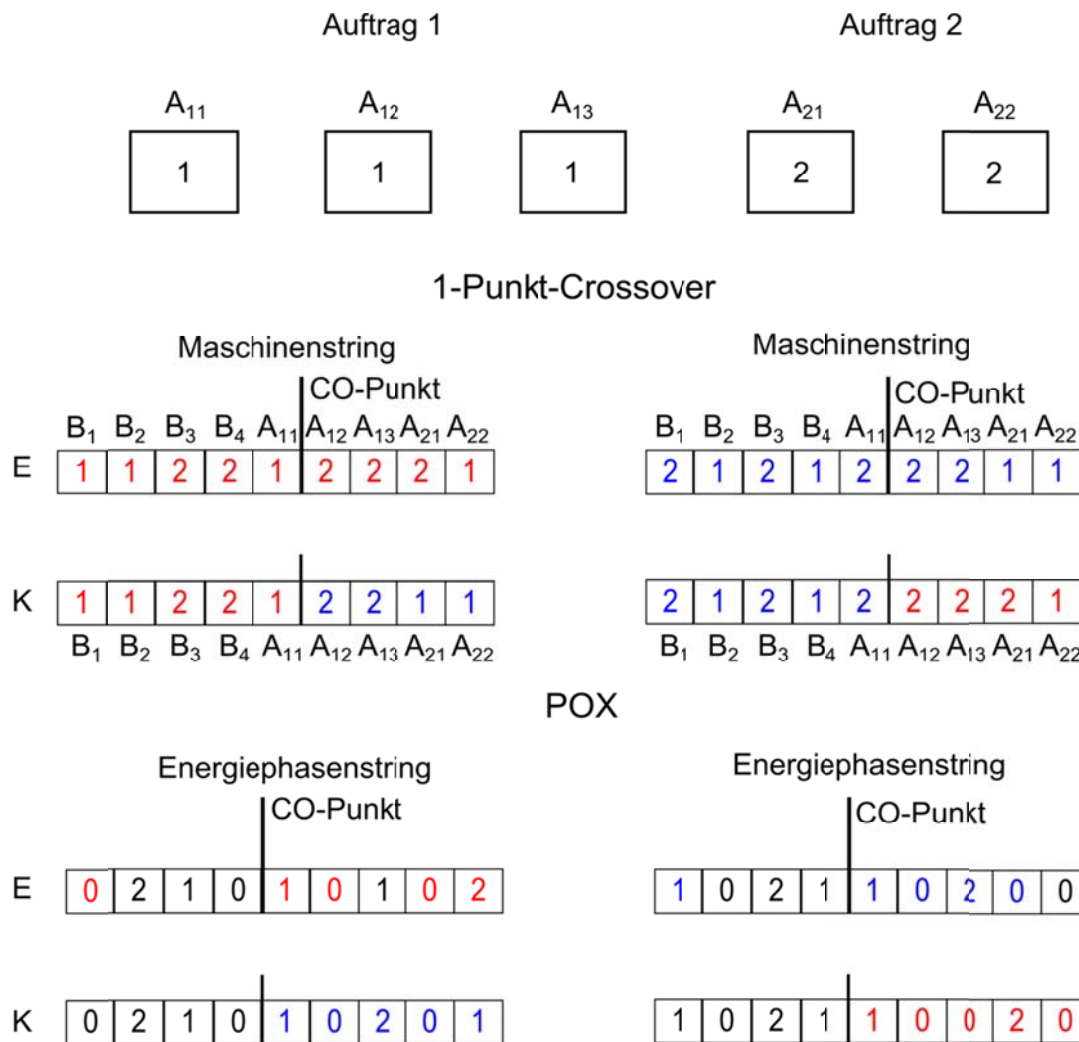
Bei der Generierung der Startpopulation wird sichergestellt, dass nur zulässige, nicht gegen Restriktionen verstoßende, Lösungen erzeugt werden können. Dies wird durch ein Eröffnungsverfahren sichergestellt, das aus einer Prioritätsregel und einer zufälligen Komponente besteht. Hierüber wird ein Gleichgewicht zwischen hoher Diversität und Lösungsgüte in der Startpopulation gewährleistet. Die Generierung einer zulässigen Startlösung (Initialisierung) teilt sich in zwei Initialisierungsphasen auf. In der ersten Initialisierungsphase werden nur reale Arbeitsgänge mit den zugehörigen Energiephasen (ohne Leerzeitarbeitsgänge) auf den Maschinen eingeplant. Dazu werden die nachfolgenden Schritte so lange wiederholt bis alle realen Arbeitsgänge mit den zugehörigen Energiephasen (die eigentliche Einplanung erfolgt wiederum auf Basis der Energiephasen) eingeplant wurden. Zunächst wird für jede Energiephase auf Basis des Fertigstellungszeitpunktes und der nachfolgenden Energiephasen des Fertigungsauftrags ein spätmöglicher Startzeitpunkt $s_{late,i,s}$ ermittelt (späteste Startzeitpunkt-Regel). Weiterhin wird für jede Energiephase der frühestmögliche Startzeitpunkt $s_{early,i,s}$, welcher sich aus der Summation der Bearbeitungszeiten aller vorheriger Energiephasen eines Auftrags ergibt. Es wird die Energiephase mit dem größten spätmöglichen Startzeitpunkt ausgewählt. Energiephasen eines Arbeitsgangs werden immer gemeinsam betrachtet. Danach wird zufällig eine zulässige Maschine ausgewählt, die über ausreichend freie Kapazität in Form von nicht belegten Planungsperioden verfügt. Nun werden zwischen $s_{late,i,s}$ und $s_{early,i,s}$ alle potentiellen Startpunkte auf der betrachteten Maschine ermittelt, bei denen keine Verletzung einer Restriktion auftritt. Bei mehreren möglichen Startzeitpunkten erfolgt eine zufällige Auswahl (zufällige Komponente). Kann kein potentieller Startzeitpunkt gefunden werden, erfolgt die Betrachtung aller anderen zulässigen Maschinen. Kann auch da kein potentieller Startzeitpunkt gefunden werden, wird die Initialisierung abgebrochen, der Belegungsplan gelöscht und die Initialisierung erneut gestartet. In der zweiten Initialisierungsphase werden dann an den noch nicht eingeplanten Planungsperioden der einzelnen Maschinen Leerzeitarbeitsgänge angeordnet. Die Initialisierung wird so oft wiederholt, bis eine vorgegebene Populationsgröße erreicht wird. Ein Individuum darf dabei nur einmal in der Population enthalten sein. Zudem muss jedes Individuum auch eine unterschiedliche Fitness besitzen.

Selektion

Nach der Erstellung der Startpopulation wird eine bestimmte Anzahl an Individuen für den evolutionären Prozess ausgewählt. Hierfür wird im vorliegenden HGA die Wettkampfselektion verwendet. Hierbei werden mehrere Individuen zufällig aus der Population ausgewählt und über die Fitnessfunktion miteinander verglichen. Die Individuen der ausgewählten Menge mit der größten Fitness werden für den evolutionären Prozess ausgewählt. Mit dieser Form der Selektion wird die Wahrscheinlichkeit der Konvergenz in einem lokalen Optimum, welche infolge der steten Auswahl der populationsweiten besten Lösungen entstehen kann, verhindert. Ein Nachteil besteht allerdings darin, dass die besten Individuen u. U. nicht in der Auswahl enthalten sind.

Crossover

Der HGA sieht zwei Rekombinationsmethoden vor. Die Rekombinationsmethoden haben die Aufgabe im evolutionären Prozess Nachkommen zu erzeugen. Durch eine Veränderung des Arbeitsgangs- und Maschinenstrings eines Chromosoms kann dabei ein neues, besseres Individuum erschaffen werden. Bei der zunächst erfolgenden Rekombinationsmethode Crossover werden Erbinformationen zwischen zwei Individuen ausgetauscht. Im vorliegenden HGA erfolgt dies sowohl für den Arbeitsgangs- als auch für den Maschinenstring. Für den Energiephasenstring wird dabei das Crossover-Verfahren POX (Precedence Preserving Order-based Crossover) verwendet [Kac02]. Für den Maschinenstring erfolgt die Anwendung des 1-Punkt Crossover-Verfahrens. Beide Verfahren werden anhand von Abbildung 11 erläutert.



E - Elternchromosom K - Kinderchromosom CO-Punkt - Crossover-Punkt

Abbildung 11: Darstellung der verwendeten Crossover-Verfahren

Beim 1-Punkt Crossover-Verfahren wird in den Maschinenstrings ein Crossover-Punkt (CO-Punkt) festgelegt. Dieser darf nur außerhalb eines Energiephasenblocks festgelegt werden. Hierdurch wird sichergestellt, dass alle Energiephasen eines Arbeitsgangs auf einer Maschine angeordnet werden. Für die Generierung der Nachkommen (Kinderchromosomen) wird nun der vom Crossover-Punkt gesehene linke Teil des Maschinenstrings des ersten Individuums (Elternchromosom) mit dem rechts vom Crossover-Punkt gelegene Teil des Maschinenstrings des zweiten Individuums kombiniert. Gleiches erfolgt für das andere Individuum. Das Crossover-Verfahren POX gehört zu den auf Permutationskodierung basierenden Verfahren. Hierdurch wird sichergestellt, dass die Menge der verschiedenen Gene (in diesem Fall Energiephasen) bei der Generierung der Nachkommen gleich bleibt. Daher ist sichergestellt, dass in jedem neu erstellten Individuum die korrekte Anzahl an Energiephasen und Leerzeitarbeitsgängen enthalten ist. Auch bei dem Crossover-Verfahren POX wird zunächst ein Crossover-Punkt in den Energiephasenstrings

festgelegt. Der linke Teil des Energiephasenstrings des ersten ursprünglichen Individuums bleibt bei der Generierung des ersten neuen Individuums erhalten. Für die Vervollständigung des Energiephasenstrings wird nun der rechte Teil des Energiephasenstrings des zweiten ursprünglichen Individuums betrachtet. Dazu werden nun von links nach rechts die Gene in das erste neue Individuum übertragen, die zur Vervollständigung der korrekten Anzahl an Energiephasen und Leerzeitarbeitsgängen im Energiephasenstring noch erforderlich sind. Ist beim Erreichen des Energiephasenstringendes des zweiten ursprünglichen Individuums der Energiephasenstring des ersten neuen Individuums noch nicht vollständig besetzt, so wird am Anfang des linken Teils des Energiephasenstrings des zweiten ursprünglichen Individuums mit der Suche fortgefahren. Gleiches erfolgt für den Energiephasenstring des zweiten neuen Individuums. Durch die Crossover-Verfahren können unzulässige Lösungen entstehen. Ursächlich hierfür sind das Nichteinhalten der Restriktionen hinsichtlich der Kapazitätseinhaltung (vgl. Gleichung 19), der technologischen Reihenfolge der Arbeitsgänge (vgl. Gleichung 9) und des Fertigstellungstermins (vgl. Gleichung 17).

Reparaturmethoden

Um diesen Unzulässigkeiten entgegen zu wirken, besitzt der vorliegende genetische Algorithmus zwei Reparaturmethoden, die bei identifizierten unzulässigen Lösungen durchgeführt werden. Die Reparaturmethoden werden nacheinander durchgeführt. Falls ein Individuum nicht vollständig repariert werden kann, führt der HGA die beschriebenen Crossover-Verfahren erneut durch. Konnte nach einer vorgegebenen Anzahl an Iterationen keine zulässige Lösung erzielt werden, so wird der evolutionäre Prozess mit einem unzulässigen Individuum fortgesetzt. Die erste Reparaturmethode hat das Ziel eine Kapazitätsverletzung aufzuheben. Dazu werden innerhalb eines Individuums Arbeitsgänge, mit allen zugehörigen Energiephasen von der am meisten überlasteten Maschine auf die am geringsten belastete Maschine verschoben. Das Konzept ähnelt der Mutation. Der Unterschied besteht darin, dass gezielt diejenigen Gene verändert werden, die für die Unzulässigkeit ursächlich sind. Wurde eine zulässige Lösung erstellt, endet das Reparaturverfahren. Die zweite Reparaturmethode verfolgt das Ziel, die technologische Reihenfolge und den Fertigstellungstermin sicherzustellen. Dazu wird die Maschinenzuordnung im Maschinenstring fixiert und stattdessen versucht, die Reihenfolge der Energiephasen und Leerzeitarbeitsgänge im Energiephasenstring gezielt zu verändern.

Mutation

Die zweite im evolutionären Prozess nach dem Crossover und den Reparaturmethoden angewendete Rekombinationsmethode ist die Mutation. Hierbei erfolgen Veränderungen in der Ausprägung der Gene (Allele) innerhalb eines Individuums. Ob ein

Individuum mutiert entscheidet eine Mutationswahrscheinlichkeit. Die Mutation basiert auf einer zufälligen Verschiebung eines Arbeitsganges auf eine andere Maschine. Dazu erfolgt zunächst die Auswahl einer Maschine. Auf dieser Maschine wird der größte zusammenhängende und ungenutzte Zeitbereich identifiziert, in den ein Arbeitsgang verschoben werden könnte. Nun wird eine weitere Maschine bestimmt, von der ein Arbeitsgang inklusive aller zugehörigen Energiephasen verschoben werden soll. Von allen dieser Maschine zugeordneten Arbeitsgängen wird zufällig ein Arbeitsgang ausgewählt. Wenn dieser Arbeitsgang in den ungenutzten Zeitbereich der anderen Maschine passt und der Arbeitsgang auf dieser Maschine produziert werden darf, erfolgt die Verschiebung. Sind diese Voraussetzungen nicht erfüllt, wird eine andere zulässige Maschine betrachtet oder nach Betrachtung aller zulässigen Maschinen ein anderer zu verschiebender Arbeitsgang ausgewählt. Ein Arbeitsgang darf dabei nur einmal verschoben werden. Ein Mutationszähler zählt die Versuche und bricht die Mutation nach einer vorgegebenen Anzahl an Versuchen ab. Auch bei der Mutation können unzulässige Lösungen infolge der Nichtbeachtung der technologischen Reihenfolge der Arbeitsgänge und des Fertigstellungszeitpunkts entstehen.

Bewertung

Im Anschluss an die Mutation erfolgt die Bewertung der im evolutionären Prozess entstandenen Individuen anhand der Fitnessfunktion. Unzulässige Lösungen werden in der Fitnessfunktion mit einem Strafbzuschlag versehen, so dass die zugehörigen Individuen in der nächsten Population nur eine sehr geringe Chance haben wiederum für den evolutionären Prozess ausgewählt zu werden.

Lokale Suche

Im nächsten Schritt des HGA schließt sich eine lokale Suche an. Die lokale Suche ist ein weiteres heuristisches Verfahren, welches in den genetischen Algorithmus integriert wird. Daher ist der vorliegende heuristische Lösungsansatz auch als hybrider genetischer Algorithmus zu bezeichnen. Mittels der lokalen Suche wird die Nachbarschaft einer bestimmten Lösung, also der angrenzende Lösungsraum nach besseren Lösungen durchsucht. Dabei werden die Merkmalsausprägungen einer Lösung immer nur geringfügig verändert. Das Ziel der lokalen Suche ist die weitere Verbesserung der Fitness der Individuen im evolutionären Prozess, was einer Reduzierung der Gesamtkosten eines Belegungsplans gleich kommt. Darunter fällt auch die Beseitigung von Unzulässigkeiten. Innerhalb der lokalen Suche wird der größte Kostenverursacher eines Individuums ermittelt, welcher sich als kritisches Arbeitsgangpaar äußert. Dem kritischen Arbeitsgangpaar können eine kritische Maschine und ein kritischer Zeitbereich zugeordnet werden. Die Verschiebung von einem der identifi-

zierten Arbeitsgänge auf der kritischen Maschine kann zu einer Reduzierung der Bestandskosten für Rohteile, Fertigwaren oder Zwischenbeständen führen, Lastspitzen abbauen oder Strafkosten für die Nichteinhaltung der technologischen Reihenfolge aufheben. Die unter Kostenaspekten beste Verschiebeoperation wird durch die lokale Suche ermittelt. Durch die lokale Suche muss aber nicht zwangsläufig ein Individuum mit besserer Fitness entstehen. Kann nach einer bestimmten Anzahl von Verschiebeversuchen des kritischen Arbeitsgangpaars keine Verbesserung der Fitness erzielt werden, so wird die Suche mit dem nächst kritischen Arbeitsgangpaar fortgesetzt. Weiterhin gibt es ein Limit wie oft ein Individuum ohne Verbesserung der Fitness durchsucht werden darf, bevor die lokale Suche beendet wird. Im Anschluss an die lokale Suche schließt sich eine Spezifizierung an. Hierbei wird nach der maschinenspezifischen Nachbarschaftssuche auch eine maschinenübergreifende Verschiebung von Arbeitsgängen geprüft. Hierbei wird über eine Betrachtung der Maschinenstundensätze eine Reduzierung der Leerzeitkosten versucht.

Populationskonzept

Am Ende des evolutionären Prozesses sind somit neue, veränderte Individuen entstanden. Im Populationskonzept wird nun geprüft, welche Individuen der aktuellen Population durch die neu entstandenen Individuen ersetzt werden. Im vorliegenden HGA werden die Individuen der Population anhand der Fitness in eine Reihenfolge gebracht und aus der schlechteren Hälfte der Population zufällig Individuen ausgewählt, die ersetzt werden. Dies sichert, im Gegensatz zum stetigen Ersetzen der schlechtesten Individuen, eine hohe Diversität der Population. Trotz der integrierten Reparaturverfahren und der Hybridisierung mittels der lokalen Suche kann trotzdem eine zulässige Lösung der Population durch eine im evolutionären Prozess entstandene unzulässige Lösung verdrängt werden.

Abbruchkriterium

Wenn das Abbruchkriterium in Form einer maximalen Rechenzeit erfüllt ist, endet der evolutionäre Prozess und der HGA gibt das Individuum mit der besten Fitness aus. Über die Genotyp-Dekodierung werden die im Chromosom des Individuums enthaltenen Informationen in einen Belegungsplan mit den zugehörigen Gesamtkosten überführt.

4.4 Validierung

Nachdem in Kapitel 4.3.1 die Funktionsfähigkeit der Methode zur energiekostenorientierten Belegungsplanung zu Grunde liegenden kombinatorischen Optimierungsproblems sichergestellt wurde, erfolgte in Kapitel 4.4 die Validierung der Me-

thode. Dazu erfolgte in Kapitel 4.4.1 die Verifikation des Kostensenkungspotentials. Daraufhin wurde in Kapitel 4.4.2 der hybride genetische Algorithmus validiert. In Kapitel 4.4.3 erfolgte dann der Test der Methode zur energiekostenorientierten Belegungsplanung anhand von aufgenommenen Realdaten.

4.4.1 Verifikation des Kostensenkungspotentials

Im diesem Kapitel erfolgte die grundlegende Überprüfung, ob die Berücksichtigung der Energiekosten in der Belegungsplanung einen positiven Einfluss auf die durch einen Belegungsplan verursachten Gesamtkosten ausübt. Hierzu wurde eine Menge an Testinstanzen generiert. Alle Testinstanzen wurden mit dem exakten Verfahren, welchem das kombinatorische Optimierungsproblem zu Grunde liegt, optimal gelöst. Bei der Generierung der Testinstanzen wurde darauf geachtet, dass sie hinsichtlich der Größe und Komplexität für das exakte Verfahren lösbar waren. Die Lösung jeder Testinstanz erfolgte dabei einmal mit dem Ecs-fjssp ohne Berücksichtigung der energetischen Zielfunktion (Lösungsvariante 1) und ein weiteres Mal mit Berücksichtigung der energetischen Zielfunktion (Lösungsvariante 2). Durch den Vergleich der Zielfunktion und den einzelnen Kostenbestandteilen beider Lösungsvarianten konnte somit das Kostensenkungspotential ermittelt werden. Das Einsparpotential wird nachfolgend anhand einer ausgewählten Testinstanz erläutert. Diese Testinstanz setzt sich aus acht Aufträgen und vier Maschinen zusammen. Der Planungshorizont beträgt 27 Planungsperioden. Die Länge einer Planungsperiode entspricht 15 Minuten, ebenso wie die Länge einer Messperiode. Somit umfasst die Testinstanz etwa eine Schichtlänge. Der Leistungspreis beträgt 100 €/kW. Eine detaillierte Aufstellung der Testinstanz mit Arbeitsgang- und Energiephasenzusammensetzung sowie den Energiebedarfen kann Tabelle 6 und Tabelle 7 im Anhang entnommen werden. Bei der Erstellung der Testinstanz wurde auf ein realistisches Verhältnis von Logistik- und Energiekosten geachtet, welches sich an den in den KMU des PA aufgenommenen Daten orientiert. Die aufgenommenen Daten selbst konnten für diese Verifikation nicht verwendet werden, da ihr Umfang für das exakte Verfahren zu groß war. Bei der grundlegenden Verifikation des Kostensenkungspotentials mit dem HGA hätten diese zwar verwendet werden können, allerdings ergibt der HGA eben nicht zuverlässig die optimale Lösung der Testinstanzen. Hierdurch ist dann ein eindeutiger Nachweis eines Kostensenkungspotentials nur eingeschränkt möglich.

Tabelle 1 zeigt die Ergebnisse der exakten Lösung der beschriebenen Testinstanz. Die dargestellten Kosten sind aufgeteilt nach Logistik- und Energiekosten. Die entstandenen Energiekosten für Lösungsvariante 1 wurden nachträglich berechnet.

Tabelle 1: Ergebnisübersicht für die Verifikation des Kostensenkungspotentials

Zielgröße	Exaktes Verfahren ohne energetische Zielfunktion (Lösungsvariante 1)	Exaktes Verfahren mit energetischer Zielfunktion (Lösungsvariante 2)
Logistikkosten	Auslastungsverlust: 320,00 €	Auslastungsverlust: 320,00 €
	Bestand: 23,04 €	Bestand: 67,58 €
	Summe: 343,04 €	Summe: 387,58 €
Energiekosten	Periodenzahl(en): 13; 14	Periodenzahl(en): 12
	Lastspitze: 51 kW	Lastspitze: 36 kW
	Summe: 5100,00 €	Summe: 3600,00 €
Ergebnis	5443,04 €	3987,58 €

Zu erkennen ist, dass die Berücksichtigung der Energiekosten in Lösungsvariante 2 gegenüber der Nichtberücksichtigung in Lösungsvariante 1 zu einem deutlich geringeren Zielfunktionswert führt. Die Gesamtkosten können infolge der Betrachtung um 1455,46 € gesenkt werden. Maßgeblich verantwortlich für den deutlich geringeren Zielfunktionswert sind die Energiekosten. Diese konnten im Vergleich um 1500 € gesenkt werden. Ausschlaggebend hierfür ist eine Reduzierung der Lastspitze um 15 kW. Dem gegenüber steht eine moderate Erhöhung der Logistikkosten. Insgesamt können durch die Betrachtung der Energiekosten in der Zielfunktion des Esc-fjssp bei der Belegungsplanung eine Kostenreduzierung von 26,74% und eine Reduzierung der Lastspitze um 29,4% erreicht werden. Wie bereits in Kapitel 4.2.5 dargestellt wurde, erfolgt durch die Methode der energiekostenorientierten Belegungsplanung nicht die korrekte Zuordnung der Energiekosten zu den einzelnen Belegungsplänen eines Abrechnungszeitraums des Energietarifs. Dies sorgt dafür, dass die Energiekosten, die dem Belegungsplan, welcher auf der ausgewählten Testinstanz basiert, zugeordnet werden, zu hoch sind und eigentlich noch auf weitere Belegungspläne in einem Abrechnungszeitraum zugeordnet werden müssten. Diese Tatsache gilt es auch bei den noch folgenden Kapiteln der Validierung zu beachten. Infolge der Betrachtung der Ergebnisse aller Testinstanzen kann festgehalten werden, dass die Berücksichtigung der Energiekosten in der Belegungsplanung einen positiven Einfluss auf die durch einen Belegungsplan verursachten Gesamtkosten ausübt.

Abbildung 12 können der Energieverbrauchsverlauf und die zugehörigen Belegungspläne beider Lösungsvarianten der Testinstanz entnommen werden. Dabei sind die Aufträge mit den zugehörigen Arbeitsgängen im Belegungsplan abgebildet. Zu erkennen ist, dass die energetische Zielfunktion zu einer deutlichen Nivellierung des Energieverbrauchsverlaufs über der Zeit führt. Aus den Belegungsplänen ist zu erkennen, dass die Lösungsvariante ohne die energetische Zielfunktion alle Aufträge mit den zugehörigen Arbeitsgängen möglichst spät einplant. Hierdurch werden die

Bestandskosten für die Fertigwaren minimiert, da diese die höchsten Bestandskosten verursachen. Im Belegungsplan der Lösungsvariante mit der energetischen Zielfunktion sind die Arbeitsgänge der Aufträge weiter im Planungshorizont verteilt, wodurch eine Nivellierung des Energieverbrauchsverlaufs und eine Reduzierung der Lastspitze erzielt werden.

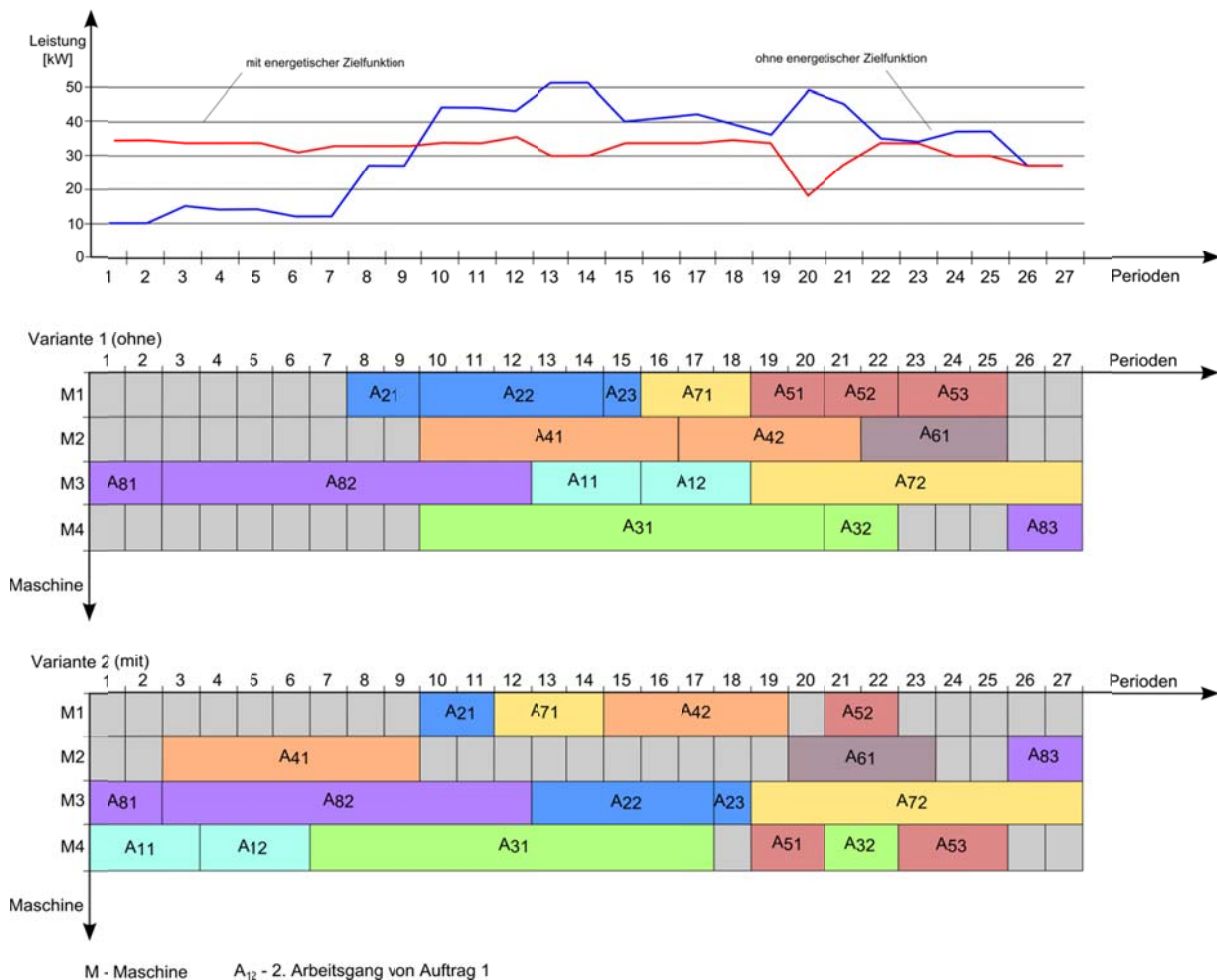


Abbildung 12: Energieverbrauchsverlauf und Belegungspläne für die Testinstanz

4.4.2 Validierung des hybriden genetischen Algorithmus

Die Validierung des HGA erfolgte durch den Vergleich des HGA mit dem exakten Verfahren, anhand der in Kapitel 4.4.1 generierten Testinstanzen. Für den Vergleich wurden die generierten Testinstanzen mit dem HGA gelöst. Als Abbruchkriterium wurde für den HGA eine maximale Rechenzeit von eineinhalb Stunden festgelegt. Die Populationsgröße wurde dabei auf 70 Individuen festgelegt. Die weiteren Ausprägungen der Einstellungsparameter des HGA können Tabelle 8 im Anhang entnommen werden. Durch den Vergleich der Lösungen des HGA mit den mittels des exakten Verfahrens errechneten optimalen Lösungen konnte auf die Lösungsgüte des HGA geschlossen werden. Die Validierung wird nachfolgend anhand der Kapitel 4.4.1 eingeführten Testinstanz beschrieben. Die Ergebnisse beider Verfahren für die

ausgewählte Testinstanz können Tabelle 2 entnommen werden. Hierbei fällt zunächst auf, dass der HGA nicht die optimale Lösung ergeben hat. Zwischen der optimalen Lösung und der besten gefundenen Lösung des HGA ergibt sich eine Differenz von 442,62 €. Dies entspricht einer prozentualen Abweichung von 9,99%. Die durchschnittliche Abweichung bei der Betrachtung aller Testinstanzen lag bei 10%. Dies entspricht einer durchschnittlichen Lösungsgüte 90%. Daher kann der entwickelte heuristische Lösungsansatz als leistungsfähig bezeichnet werden. Für kleine Testinstanzen ergab der HGA zuverlässig die optimale Lösung.

Tabelle 2: Ergebnisübersicht für Validierung des HGA

Zielgröße	Exaktes Verfahren	Hybrider genetischer Algorithmus
Logistikkosten	Auslastungsverlust: 320,00 €	Auslastungsverlust: 340,00 €
	Bestand: 67,58 €	Bestand: 90,20 €
	Summe: 387,58 €	Summe: 430,20 €
Energiekosten	Periodenzahl(en): 12	Periodenzahl(en): 2; 3; 5; 16
	Lastspitze: 36 kW	Lastspitze: 40 kW
	Summe: 3600,00 €	Summe: 4000,00 €
Ergebnis	3987,58 €	4430,20 €

Abbildung 13 können der Energieverbrauchsverlauf und die zugehörigen Belegungspläne der Lösungen des exakten Verfahrens und des HGA entnommen werden. Zu beobachten ist, dass auch der HGA zu einer Nivellierung des Energieverbrauchsverlaufs über der Zeit führt. In den entsprechenden Belegungsplänen können keine Gemeinsamkeiten identifiziert werden.

Der HGA führt im Gegensatz zu dem exakten Verfahren zu einer erheblichen Zeiterparnis. Bei kleinen Testinstanzen ist der Zeitaufwand beider Verfahren nahezu identisch. Mit zunehmender Komplexität und Größe der Testinstanz benötigt das exakte Verfahren aber (mindestens) exponentiell mehr Zeit. Hingegen steigt die Rechenzeit des HGA nur moderat an. Für sehr große Testinstanzen, wie bspw. das im nächsten Schritt erstellte Praxisbeispiel aus den aufgenommenen Unternehmensdaten, ist eine Lösung mit dem exakten Verfahren nicht mehr möglich. Somit führt der HGA in diesem Fall sogar dazu, dass eine Lösung des Praxisbeispiels überhaupt erst möglich ist.

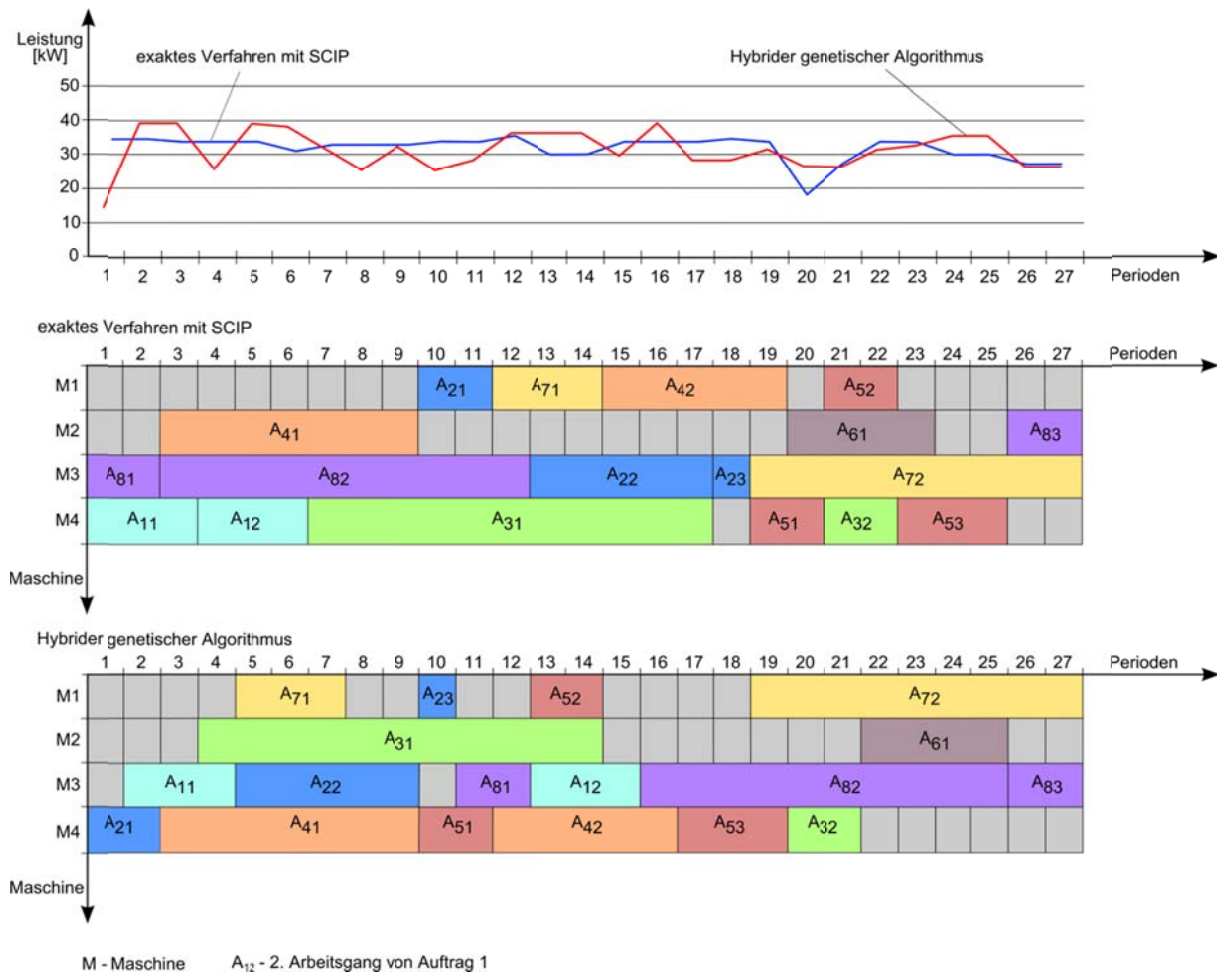


Abbildung 13: Energieverbrauchsverlauf und Belegungspläne für die Testinstanz (2)

4.4.3 Validierung anhand von Realdaten

Für die Validierung anhand von Realdaten wurden Energieverbräuche und zugehörige Auftragsdaten bei zwei KMU des PA aufgenommen. Dabei handelte es sich um ein Spritzguss- und ein Schmiedeunternehmen. Bei beiden Unternehmen entsteht prozessbedingt ein hoher Energieverbrauch. Hierfür verantwortlich ist vornehmlich ein energieintensiver Erwärmungsprozess. Die Fertigung in beiden KMU erfolgt in Form einer nicht verketteten Struktur und ist jeweils einstufig. Dies bedeutet, dass die zu erstellenden Produkte nur einen Arbeitsgang benötigen. Die Produktionsaufträge beider Unternehmen beinhalten zumeist größere Losgrößen, da bei einem Produktwechsel ein hoher Rüstaufwand entsteht. Daher kann die Bearbeitung eines Produktionsauftrags mehrere Tage umfassen. In dem Spritzgussunternehmen wird die Spritzgussmaschine zunächst mit dem Rohmaterial befüllt. Dieses wird dann aufgeschmolzen, durch eine Form gepresst und abgekühlt. So entstehen kleinere Kunststoffteile in Form von Schüttgut. Das Unternehmen verfügt an dem untersuchten Standort über 30 Spritzgussmaschinen. In dem Schmiedeunternehmen werden die Schmiederohteile (im Wesentlichen Stahl) in einem Heizofen induktiv erwärmt, da-

nach mittels einer Schmiedepresse umgeformt und schließlich entgratet. Das Unternehmen verfügt über fünf Schmiedepressen mit zugehörigen Heizöfen.

Ziel der Datenaufnahme war die Ermittlung von realen Energieverbräuchen, mit denen die entwickelte Methode zur energiekostenorientierten Belegungsplanung exemplarisch in der Praxis angewendet und verifiziert werden kann. Dafür müssen die Energieverbräuche von Maschinen einzeln messbar sein. Unternehmen verfügen zu einer überwiegenden Mehrheit allerdings nur über einen Hauptmesszähler des Energieversorgers, der lediglich den Gesamtenergieverbrauch eines Unternehmens erfassen kann. Keines der Unternehmen des PA verfügt über installierte Strommesszähler an einzelnen Anlagen. Daher wurde im Rahmen des durchgeführten Forschungsprojekts ein mobiles Messgerät (FLUKE 1735 Power Logger) angeschafft. Durch das Vorhandensein lediglich eines Messgeräts, der langen Bearbeitungszeit der Produktionsaufträge und der notwendigen Einarbeitung mit dem Messgerät war die Datenaufnahme sehr zeitintensiv. Daher konzentrierte sich die Aufnahme der Energieverbräuche auf repräsentative Produktionsaufträge. Eine vollständige Erfassung aller Produktionsaufträge eines Belegungsplans war innerhalb des Forschungsprojekts nicht möglich.

Für die Datenaufnahme wurde in beiden KMU eine geeignete Auswahl an Maschinen und Produktionsaufträgen getroffen und ein geeigneter Betrachtungszeitraum für die Energieverbrauchsmessungen ausgewählt. Der Betrachtungszeitraum umfasste für ein KMU eine Woche und für das zweite KMU drei Wochen. Die Produktionsaufträge wurden derart ausgewählt, dass jeweils Energieverbräuche für Aufträge an verschiedenen Maschinengrößen (z. B. 1 – 2,5 Tonnen Presskraft) sowie für einzelne Maschinen die Energieverbräuche mehrerer Aufträge erfasst wurden. Weiterhin wurden bevorzugt Aufträge ausgewählt, die wiederkehrend produziert werden, um somit einen realitätsnahen Belegungsplan für die Validierung erstellen zu können. Für die ausgewählten Produktionsaufträge der beiden KMU wurde der Energieverbrauch in Form der Wirkleistung über der Zeit erfasst und zusammen mit der Auftragsnummer und der Maschinenbezeichnung in einer Excel-Datenbank gespeichert. Abbildung 14 stellt einen Ausschnitt aus dieser Excel-Datenbank dar. Teilweise wurde aufgrund der langen Bearbeitungszeit von Aufträgen und der begrenzten Aufnahmekapazität des Messgeräts pro 15 Minuten nur ein gemittelter Messwert erfasst. Der hieraus resultierende Fehler ist in den betrachteten Fällen aber vernachlässigbar, da der Energieverbrauch über der Zeit nur geringen Schwankungen unterlag. Weiterhin wurden in den beiden KMU die entsprechenden Auftragsdaten aufgenommen. Diese umfassten alle zur Anwendung des HGA benötigten Informationen, wie Bearbeitungszeiten, Maschinenzuordnungen und Kosten.

Auftrag	Maschine	Periode	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
00746	SM-54	Energiewert	4550	14080	10520	8440	8600	9050	8960	8910	8290	8650	8640	8890	8720
		Abw. V. MW		209,450549	25,2840909	19,7718631	1,8957346	6,22065728	3,02798007	1,68330956	5,70973612	0,66985646	0,68965517	2,27207363	0,06375112
		Mittelwert	4550	14080	10520	8440	8520	8696,66667	8762,5	8792	8708,33333	8700	8692,5	8714,44444	8715
		Phase	1	2	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
		Anz. Per /Phase	1	1	1	1									
00761	SM-54	Energiewert	6520	6440	4400	4800	5730	6250	6320	6810	7910	7810	8660	7220	8750
		Abw. V. MW		1,22699387	32,0987654	9,09090909	24,5652174	9,07504363	5,50918197	11,6393443	16,1527166	1,2642225	10,178117	16,6281755	21,1911357
		Mittelwert	6520	6480	4400	4600	5730	5990	6100	6810	7910	7860	8680	7220	8750
		Phase	1	1	2	2	3	3	3	4	5	5	6	7	8
		Anz. Per /Phase		2	2	2			3	1		2	1	1	
FA19888	SM-54	Energiewert	4600	4440	6440	7570	7670	7070	7580	7590	7290	7570	7530	6950	7680
		Abw. V. MW		3,47826087	42,4778761	17,5465839	1,32100396	7,21784777	1,92738682	1,57243225	2,74813234	1,45186509	0,70691632	7,13211959	3,44208321
		Mittelwert	4600	4520	6440	7570	7620	7436,66667	7472,5	7496	7461,66667	7477,14286	7483,75	7424,44444	7450
		Phase	1	1	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
		Anz. Per /Phase		2	1										
00843	SM-57	Energiewert	250	6630	2690	4470	5850	6480	6370	6530	6410	6990	7130	7030	6830
		Abw. V. MW		2552	59,4268477	66,1710037	30,8724832	10,7692308	1,69753086	1,63424125	0,77399381	8,414114	8,75533862	5,68779754	1,85342991
		Mittelwert	250	6630	2690	4470	5850	6480	6425	6460	6447,5	6556	6651,66667	6705,71429	6721,25
		Phase	1	2	3	4	5	6	6	6	6	6	6	6	6
		Anz. Per /Phase	1	1	1	1	1								
01775	SM-57	Energiewert	2780	2750	2750	2730	11510	4620	4590	9280	10690	12320	12670	12200	10530
		Abw. V. MW		1,07913669	0,54249548	1,08695652	318,165304	59,8609904	0,64935065	101,520087	15,1939655	15,2478952	2,84090909	2,36094438	15,0578112
		Mittelwert	2780	2765	2760	2752,5	11510	4620	4605	9280	10690	12320	12495	12396,6667	10530
		Phase	1	1	1	1	2	3	3	4	5	6	6	6	7
		Anz. Per /Phase				4	1		2	1	1			3	1
Energiewert der Phase		Rüsten													

Abbildung 14: Ausschnitt aus der Excel-Datenbank der aufgenommenen Energieverbräuche

Daraufhin erfolgte die Aufbereitung der aufgenommenen Energieverbräuche. Zunächst erfolgte dabei durch Mittelwertbildung die Aggregation der Daten auf eine bestimmte Periodenlänge. Bei dem KMU, für das pro 15 Minuten nur ein Messwert erfasst wurde, entfiel die Aggregation. Die Periodenlänge wurde folglich auf 15 Minuten festgelegt. Für das zweite KMU wurde die Periodenlänge auf fünf Minuten festgelegt, um einerseits den durch die Aggregation entstehenden Fehler nicht zu groß werden zu lassen (Fehler wird größer, je länger eine Planungsperiode ist) und andererseits die Gesamtanzahl an Planungsperioden für die im Projekt entstandene Methode zu begrenzen (Komplexität eines Planungsproblems steigt mit der Anzahl an betrachteten Planungsperioden). Pro Planungsperiode steht somit ein Messwert zur Verfügung. In einem weiteren Aggregationsschritt wurde der Energieverbrauchsverlauf eines Auftrags in Energiephasen unterteilt, in denen der Energieverbrauch nahezu konstant ist. Eine neue Energiephase beginnt, wenn der Energieverbrauchswert einer Planungsperiode um mehr als 10 % vom Mittelwert der Energieverbräuche der bereits in der Energiephase enthaltenen Planungsperioden abweicht. Durch diese Approximation ergibt sich für jede Energiephase ein Energieverbrauchswert. Die Notwendigkeit für die Verwendung dieser Energiephasen wurde in Kapitel 4.2.3 erläutert.

Infolge der Datenaufbereitung ist nachfolgend in Abbildung 15 und Abbildung 16 für jeweils eine Maschine der beiden KMU dargestellt, dass sich der Energieverbrauch der Maschinen in Abhängigkeit des bearbeiteten Auftrags unterscheidet. Mit diesem Nachweis ist eine zentrale Voraussetzung für die Anwendung der entwickelten Methode erfüllt.

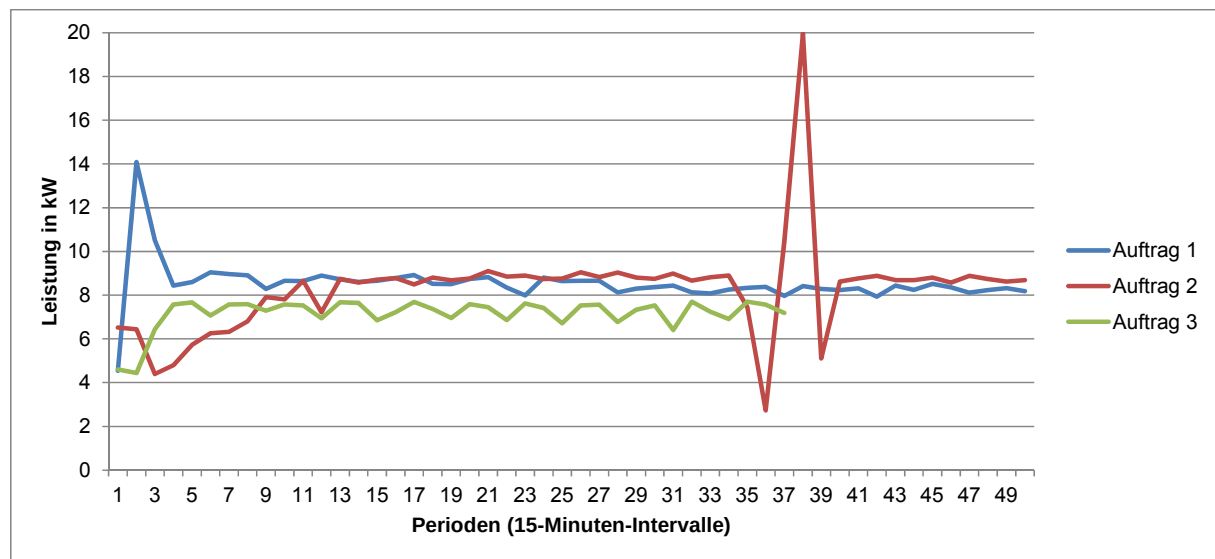


Abbildung 15: Energieverbräuche verschiedener Aufträge auf einer Spritzgussmaschine

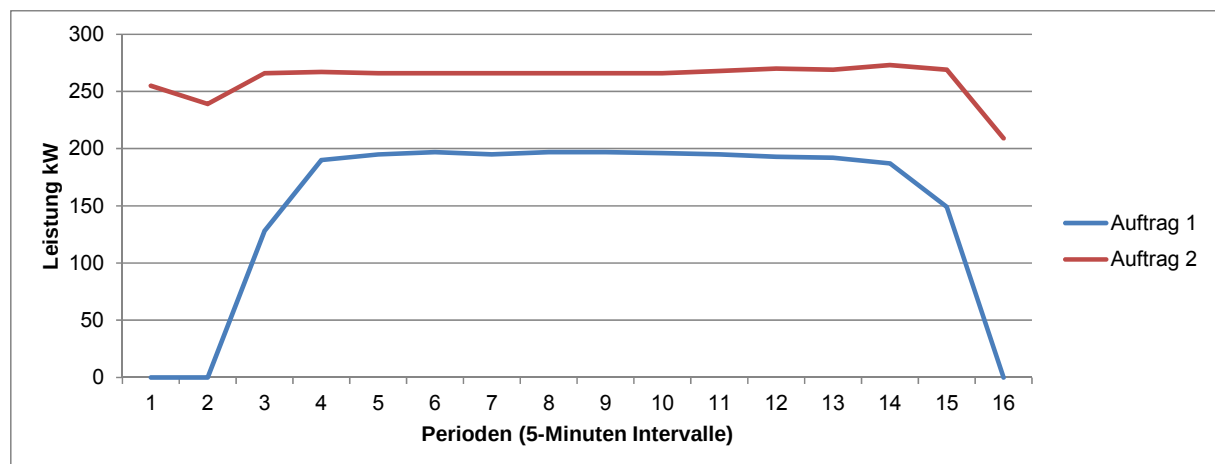


Abbildung 16: Energieverbräuche verschiedener Aufträge auf einem Induktionsofen

Die Validierung der Methode zur energiekostenorientierten Belegungsplanung erfolgte anhand der aufgenommenen Realdaten aus dem Spritzgussunternehmen. Zur Validierung der Methode anhand dieser Realdaten sollte ein Belegungsplan für zwölf Aufträge, sechs Maschinen für einen Planungshorizont von acht Tagen erstellt werden. Jeder Auftrag besteht dabei nur aus einem Arbeitsgang. Hinsichtlich der Maschine, auf der ein Auftrag bearbeitet werden darf, bestehen gewisse Freiheitsgrade. Die dem Praxisbeispiel zu Grunde liegenden Daten sind aus Datenschutzgründen nicht aufgeführt. Ein Planungshorizont von acht Tagen entspricht bei einem Zweischichtbetrieb und einer Periodenlänge von 15 Minuten 512 Planungsperioden. Die Periodenanzahl ist maßgeblich dafür, dass eine exakte Lösung des Praxisbeispiels nicht gelang. Das Praxisbeispiel wurde mit dem HGA gelöst. Parallel dazu hat ein Produktionsplaner des Spritzgussunternehmens einen Praxis-Belegungsplan erstellt. Hierfür wurde ein programmiertes Excel-Tool verwendet, welches die Erstellung

eines Belegungsplans unterstützt und die resultierenden Kosten ermittelt. Bei der Erstellung des Praxis-Belegungsplans hat der Produktionsplaner die im Unternehmen übliche Vorgehensweise verwendet, welche stark auf Erfahrungswissen basiert und Energiekosten nicht berücksichtigt. Hierdurch ergab sich eine in der Unternehmenspraxis entstandene Vergleichsgrundlage. In Tabelle 3 sind die Ergebnisse des HGA und des Produktionsplaners gegenübergestellt.

Tabelle 3: Ergebnisübersicht für die Validierung anhand Realdaten

Zielgröße	Produktionsplaner	Hybrider genetischer Algorithmus
Logistikkosten	Auslastungsverlust: 3429,70 €	Auslastungsverlust: 3426,42 €
	Bestand: 12,08 €	Bestand: 11,52 €
	Summe: 3441,78 €	Summe: 3437,94 €
Energiekosten	Periodenzahl(en): 286	Periodenzahl(en): 115
	Lastspitze: 117 kW	Lastspitze: 73 kW
	Summe: 5313,01 €	Summe: 3323,50 €
Ergebnis (€)	8754,79 €	6761,44 €

Hierbei ist zu erkennen, dass die beste vom HGA gefundene Lösung zu deutlich geringeren Gesamtkosten führt als der Praxisbelegungsplan. Die Kosten können in diesem Praxisbeispiel um 1993 € reduziert werden. Dies entspricht einer prozentualen Einsparung von 23 %. Maßgeblich hierfür ist wiederum die Reduzierung der Energiekosten. Diese konnten um 1989 € reduziert werden. Grundlage hierfür war die Reduzierung der Lastspitze um 44 kW. Auch die Logistikkosten konnten durch die Anwendung des HGA geringfügig verringert werden. Das große Einsparpotential in diesem Praxisbeispiel ist auch dem Verhältnis von Energiekosten und Logistikkosten geschuldet. Dieses Verhältnis ist stark unternehmensabhängig, wodurch aus dem Praxisbeispiel nicht auf ein allgemeingültiges Einsparpotential infolge der Berücksichtigung von Energiekosten bei der Belegungsplanung in der unternehmerischen Praxis geschlossen werden kann. Das Praxisbeispiel macht jedoch deutlich, dass Unternehmen mit der Anwendung der entstandenen Methode Energiekosten einsparen können, ohne massive Verschlechterungen der logistischen Zielgrößen befürchten zu müssen. In dem vorliegenden Praxisbeispiel waren die Logistikkosten im Vergleich zu den Energiekosten eher gering, wodurch die energetische Zielfunktion innerhalb des HGA eine höhere Bedeutung erlangte. Auf eine Darstellung der erstellten Belegungspläne wurde aufgrund der unübersichtlichen Darstellung (512 Planungsperioden) und des Datenschutzes verzichtet.

5 Innovativer Beitrag und wirtschaftlicher Nutzen

5.1 Voraussichtliche Nutzung der angestrebten Forschungsergebnisse

Mit der Methode zur energiekostenorientierten Belegungsplanung lassen sich Energiekosten senken, ohne eine deutliche Verschlechterung der Logistikkosten in Kauf nehmen zu müssen. Die Methode kann branchenübergreifend in der Produktionsplanung produzierender Unternehmen eingesetzt werden. Durch die Implementierung als HGA ist eine Nutzung ohne das Beschaffen von Spezialsoftware möglich. Benötigt wird nur eine JAVA-Umgebung. Diese macht den Einsatz der Methode auch für KMU interessant. Allerdings werden für die Methode die 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 einzelnen Maschinen und Anlagen erfassen, stellt dies ein Hindernis für die kurzfristige Anwendung der Projektergebnisse dar. Aufgrund von gesetzlichen Vorgaben ist für eine Reduzierung der EEG Umlage seit dem Jahr 2013 eine Zertifizierung nach ISO 50001 verpflichtend. Für die Zertifizierung ist auch die Installation von Energie-Monitoring-Systemen mit entsprechenden Messgeräten vorgesehen [Ree12]. Daher ist mittelfristig davon auszugehen, dass nach und nach mehr Unternehmen in ihrer Fertigung Messgeräte installieren und somit die benötigten Energieverbräuche zur Anwendung der Methode verfügbar haben. Kurzfristig werden die Hauptnutzer der Methode zunächst ERP/MES-Hersteller sein, die die Methode als Rechenvorschrift in ihre Module zur Belegungsplanung integrieren können. Da ein Großteil der produzierenden Unternehmen in Deutschland ERP/MES-Systeme zur Durchführung der Produktionsplanung nutzt, ist eine weite Verbreitung der Methode über ERP/MES-Hersteller und -Anwender zu erwarten.

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

Die Methode zur energiekostenorientierten Belegungsplanung bietet KMU die Möglichkeit der Erstellung von kosteneffizienten Belegungsplänen, wobei insbesondere eine Reduzierung der Energiekosten bewirkt wird. Hierfür werden so gut wie keine zusätzlichen Investitionen benötigt. Die Mittel für die Beschaffung für Messeinrichtungen müssen die Unternehmen mittelfristig tätigen, um eine Zertifizierung nach ISO 50001 zu erreichen. Das Kostensenkungspotential durch die entwickelte Methode ist stark unternehmensabhängig. Insbesondere die bezogene Gesamtenergiemenge sowie die Möglichkeit Aufträge flexibel einzuplanen beeinflussen die Höhe des Potentials zur Energiekostensenkung. Aber gerade vor dem Hintergrund steigender

Energiekosten wird dieses Potential zukünftig ansteigen und kann dann die Finanzierungssituation und die Wettbewerbsfähigkeit von KMU positiv beeinflussen.

6 Verwendung der Zuwendung

Das Projekt wurde am IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover gemeinnützige GmbH vom 01.08.2011 bis zum 31.07.2013 von einem wissenschaftlichen Mitarbeiter (TVL E 13) mit fundierten Kenntnissen im Bereich der Produktionslogistik bearbeitet. Der wissenschaftliche Mitarbeiter ist während der Projektlaufzeit im Umfang zwei Monaten durch eine studentische Hilfskraft unterstützt worden. Bei der Implementierung HGA ist der wissenschaftliche Mitarbeiter von einem technischen Mitarbeiter im Umfang von drei 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 4 aufgeführt:

Tabelle 4: Mitglieder des projektbegleitenden Ausschusses

Unternehmen	KMU	Ansprechpartner	Telefonnummer
GTT Gesellschaft für Technologietransfer mbH	X	Herr Nyhuis	0511 279470
VIDEC GmbH	X	Herr Ochotzki	04445 950017
KB Schmiedetechnik GmbH	X	Herr Henneke	02331035080
Forbo Siegling GmbH		Herr Dr. Neelen	0511 6704219
Actemium Controlmatic Gesellschaft für Automation und Elektrotechnik mbH		Herr Baumann	02041 4001060
Klaus Brummernhenrich GmbH & Co. KG	X	Herr Orbke	05222 8071619
Grean GmbH	X	Herr Heinen	0511 76218291

Die bereits durchgeführten und noch geplanten Transfermaßnahmen sind dem Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft in Tabelle 5 zu entnehmen.

Tabelle 5: 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	02.12.2011
		Vorstellung der Ergebnisse	01.03.2013
		Abschlusspräsentation	22.07.2013
Veröffentlichung, Information der interessierten Öffentlichkeit	Ergebnistransfer in die Wirtschaft	Einrichtung einer Projekthomepage (www.energiekostenorientierte-belegungsplanung.de)	11/2011
		Veröffentlichung einer Pressemitteilungen (http://www.iph-hanno-ver.de/sites/default/files/press/2011/IPH_2011017_EnKoBel.pdf)	11/2011
		Veröffentlichung: Böning, C.; Rochow, P.: Sparen nach Plan: Energieorientierte Fabrik- und Belegungsplanung. In: phi - Produktionstechnik Hannover informiert, PZH-Verlag, 13. Jg. (2012), H. 2, S. 12.	10/2012
		Veröffentlichung: Böning, C.; Wiegand, M.: Fertigung gut planen – Energiekosten sparen. In: Technologieinformation, o. Jg. (2013), H. 1, S. 15.	03/2013
		Veröffentlichung: Böning, C.; Nyhuis, P.; Ullmann, G.: Sparen trotz konstantem Energieverbrauch. In: Computer & Automation, o. Jg. (2013), H. 4, S. 28-31.	04/2013
		Veröffentlichung: Böning, C.: Energiekosten in der Produktion: Gut geplant ist halb gespart. In: Göttinger Wirtschafts-Dienst, 7. Jg. (2013), H. 11, S. 2.	03/2013
		Veröffentlichung: Energiekosten in der Produktion: Gut geplant ist halb gespart. In: WirtschaftsDienst Hannover, 2. Jg. (2013), H. 10, S. 2.	03/2013
		Veröffentlichung: Böning, C.: Nach Belegungsplan Kosten sparen. In: IPH - Jahresbericht 2012.	03/2013
Weiterbildung während der Projektlaufzeit	Betreuung studentischer Arbeiten	Betreuung der Masterarbeit „Modellierung eines energiekostenorientierten Optimierungsmodells der Maschinenbelegungsplanung und Entwicklung eines heuristischen Lösungsansatzes“; Henrik Prinzhorn, Leibniz Universität Hannover	03/2013 bis 09/2013

Maßnahme	Ziel	Rahmen	Zeitraum
Nach dem Berichtszeitraum geplante Transfermaßnahmen			
Weiterbildung	Qualifizierung von Mitarbeitern aus KMU	Aufnahme der Projekthalte in das Seminarprogramm des IPH	Ab 2015
	Qualifizierung wissenschaftlicher Mitarbeiter des IPH	Weiterverwendung der Projekthalte zur Unterstützung der Anfertigung einer Dissertation	Ab 08/2013
	Qualifizierung von Studenten	Übernahme der Projektergebnisse in die vom IPH betreute Vorlesung „Anlagenmanagement“	Ab Sommersemester 2014
Weiterentwicklung der Forschungsergebnisse	Nutzung der erzielten Projektergebnisse für weitere Forschungsvorhaben	Beantrage Forschungsprojekte: Integration zeitvariabler Energiekosten in Verfahren der Fertigungssteuerung (IGF-Nummer 17900 N); Flexible Auftragsabwicklung zur Energiekostensenkung (BVL-Nr. 502)	Ab 2014
Veröffentlichung, Information der interessierten Öffentlichkeit	Ergebnistransfer in die Wirtschaft	Veröffentlichung in der Zeitschrift Technologieinformation	11/2013
		Veröffentlichung in der Zeitschrift IT&Production	11/2013
		Veröffentlichung im European Journal of Operations Research	04/2014

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

Dipl.-Wirtsch.-Ing. Christian Böning

Wissenschaftlicher Mitarbeiter der Abteilung Logistik des IPH

Hannover, 11.11.2013

Prof. Dr.-Ing. habil.

Peter Nyhuis

Geschäftsführender Gesellschafter

Dr.-Ing.

Georg Ullmann

Koordinierender Geschäftsführer

9 Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben 16904 N der Forschungsvereinigung Bundesvereinigung Logistik e. V. (BVL) wurde über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e. V. (AiF) im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Für die Förderung sei an dieser Stelle gedankt.

10 Anhang

Tabelle 6: Darstellung der Testinstanz für die Verifikation der Methode

Auftrag	Arbeitsgangindex	Energiephasenindex	Bearbeitungszeit (in Planungsperioden)	Energiebedarf (in kW)	Fertigstellungstermin (in Planungsperioden)
1	1	1 2	2 1	25 4	20
	2	3	3	5	
2	1	1	2	15	20
	2	2 3	2 3	8 7	
	3	4	1	10	
3	1	1 2 3 4	3 2 2 4	7 5 12 15	22
	2	5	2	10	
4	1	1 2	3 4	15 14	22
	2	3 4	3 2	12 25	
5	1	1	2	4	25
	2	2	2	5	
	3	3	3	15	
6	1	1 2	1 3	8 7	25
7	1	1 2	2 1	10 7	27
	2	3 4 5	3 2 4	5 12 15	
8	1	1	2	1	27
	2	2 3 4 5	1 2 4 3	15 14 12 14	
	3	6	2	12	

Tabelle 7: Darstellung der Testinstanz für die Verifikation der Methode (2)

Auftrag	Kapitalbindungskosten (€)				Maschinen				Maschinen-kostensatz (€)	
	kb ₀	kb ₁	kb ₂	kb ₃	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄		
1	0,01	1,5	1	0	0	0	1	1	M ₁	10
2	0,01	5	3	1	1	0	1	1	M ₂	10
3	0,02	2	5	0	0	1	0	1	M ₃	20
4	0,02	3	1,5	0	1	1	0	1	M ₄	10
5	0,01	2,5	1	1	1	0	0	1	Leistungspreis (€/kW) 100	
6	0,015	1,5	0	0	0	1	0	0		
7	0,033	1	3	0	1	1	1	0		
8	0,005	2,5	1	5	1	1	1	1		

Tabelle 8: Einstellungsparameter des HGA

Parameter	Eigenschaft	Wert
popSize	Populationsgröße	70
TimeDuration	Abbruchkriterium	90 Minuten
Mue	Anzahl Individuen bei Wettkampfselektion	6
LimitCO	Anzahl Crossoverversuche	10
Limit_shiftingKap	Anzahl Reparaturversuche der ersten Reparaturmethode	40 ; 150
Limit_Repair	Anzahl Reparaturversuche der zweiten Reparaturmethode	350
Mutate_rate	Mutationswahrscheinlichkeit	50%
Limit_tabuCounter	Anzahl Fixierungen kritischer Arbeitsgangpaare	15 ; 5
Limit_noAssign	Anzahl Zuordnungsversuche für ein kritisches Arbeitsgangpaar	20
Limit_noImprove	Anzahl unverbessernder Versuche	20
limitInserting	Anzahl maschinenübergreifender Verschiebungen	10

11 Literaturverzeichnis

- [Ack11] Acker, I. J.: Mehrkriterielles Job-Shop Scheduling mit alternativen Maschinenfolgen. In: Wenger, W.; Geiger, M. J.; Kleine, A. (Hrsg.): Business Excellence in Produktion und Logistik. Gabler Verlag, Wiesbaden, 2011.
- [BEW12] Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.: Strompreisanalyse,
[http://bdew.de/internet.nsf/id/0E5D39E2E798737FC1257A09002D8C9C/\\$file/120525%20BDEW-Strompreisanalyse%202012%20Chartsatz%20gesamt.pdf](http://bdew.de/internet.nsf/id/0E5D39E2E798737FC1257A09002D8C9C/$file/120525%20BDEW-Strompreisanalyse%202012%20Chartsatz%20gesamt.pdf), 14.08.2013.
- [Bmw08] Bundesministerium für Wirtschaft (Hrsg.): Energiedaten, 2008.
- [Bre00] Breithaupt, J.-W.: Rückstandsorientierte Produktionsregelungen von Fertigungsbereichen, Dissertation, Universität Hannover, 2000.
- [Dem13] Demir, Y.; Isleyen, S. K.: Evaluation of mathematical models for flexible job-shop scheduling problems. In: Applied Mathematical Modelling, vol. 37 (2013), pp. 977-988.
- [Eng09] Engelmann, J.; Müller, E.; Löffler, T.; Strauch, J.: Energieeffiziente Fabriken planen und betreiben, Springer-Verlag, Berlin u. a., 2009.
- [Fat07] Fattahi, P.; Mehrabad, M. S.; Jolai, F.: Mathematical modeling and heuristic approaches to flexible job shop scheduling problems. In: Journal of intelligent Manufacturing, vol. 18 (2007), pp.331-342.
- [Jun07] Junge, M.: Simulationsgestützte Entwicklung und Optimierung einer energieeffizienten Produktionssteuerung, Dissertation, Universität Kassel, 2007.
- [Löd08] Lödding, H.: Verfahren der Fertigungssteuerung, 2. Aufl., Springer-Verlag, Berlin u. a., 2008.
- [Hen02] Henning, A.: Praktische Job-Shop Scheduling- Probleme. Dissertation, Universität Jena, 2002.
- [Kac02] Kacem, S. Hammadi, P. Borne. Pareto-optimality approach for flexible job-shop scheduling problems: Hybridization of evolutionary algorithms and fuzzy logic. In: Mathematics and Computers in Simulation, vol. 60 (2002), pp. 245-276.
- [Mac02] McCarl, B. A. et al.: McCarlGams User Guide, Version 24.0, 2002.
<http://www.gams.com/dd/docs/bigdocs/gams2002/mccarlgamsuserguide.pdf> am 10.10.2013.
- [Nis97] Nissen, V.: Einführung in Evolutionäre Algorithmen: Optimierung nach dem Vorbild der Evolution, Vieweg Verlag, Braunschweig, 1997.
- [Rag06] Rager, M.: Energieorientierte Produktionsplanung, Dissertation, Universität Augsburg, 2006.

- [Ree12] Reese, K.: DIN EN ISO 50001 in der Praxis: ein Leitfaden für Aufbau und Betrieb eines Energiemanagementsystems. Vulkan-Verlag, Essen, 2012.
- [Sch11] Schlesinger, M.; Wunsch, M.: Steigende Strompreise für die Industrie unvermeidbar. In: Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 61. Jg. (2011), H. 12, S. 26 – 29.
- [Wag12] Wagner, J. et al.: Energieeffizienz in der Industrie. In: PRODUCTIVITY Management, GITO-Verlag, 17. Jg. (2012), H. 4, S. 47 – 50.

12 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Energieverbrauch mit vereinbarten Leistungsgrenzen.....	9
Abbildung 2: Kapazitätshüllkurve von Energie.....	10
Abbildung 3: Identifikation der Lastspitze durch den Energieversorger	12
Abbildung 4: Abbildung der logistischen Zielgrößen mit Informationen aus einem Belegungsplan	16
Abbildung 5: Ermittlung des Energieverbrauchsverlaufs aus einem Belegungsplan	17
Abbildung 6: Ergebnisse der Studie zur Priorisierung der logistischen Zielgrößen...	18
Abbildung 7: Einführung von Energiephasen.....	20
Abbildung 8: Beeinflussung der Belegungsplanung durch frühere/spätere Belegungspläne	31
Abbildung 9: Aufbau des hybriden genetischen Algorithmus.....	34
Abbildung 10: Kodierung eines Belegungsplans	35
Abbildung 11: Darstellung der verwendeten Crossover-Verfahren.....	38
Abbildung 12: Energieverbrauchsverlauf und Belegungspläne für die Testinstanz ..	44
Abbildung 13: Energieverbrauchsverlauf und Belegungspläne für die Testinstanz (2)	46
Abbildung 14: Ausschnitt aus der Excel-Datenbank der aufgenommenen Energieverbräuche	48
Abbildung 15: Energieverbräuche verschiedener Aufträge auf einer Spritzgussmaschine.....	49
Abbildung 16: Energieverbräuche verschiedener Aufträge auf einem Induktionsofen	49

13 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ergebnisübersicht für die Verifikation des Kostensenkungspotentials	43
Tabelle 2: Ergebnisübersicht für Validierung des HGA.....	45
Tabelle 3: Ergebnisübersicht für die Validierung anhand Realdaten	50
Tabelle 4: Mitglieder des projektbegleitenden Ausschusses	52
Tabelle 5: Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft (spezifische durchgeführte und geplante Transfermaßnahmen)	53
Tabelle 6: Darstellung der Testinstanz für die Verifikation der Methode.....	57
Tabelle 7: Darstellung der Testinstanz für die Verifikation der Methode (2)	58
Tabelle 8: Einstellungsparameter des HGA.....	58