

Kopplung von Energie-, Scheduling- und Logistikmodellen zur Entscheidungsunterstützung

# Integriertes Modellkonzept für energieorientierte PPS

M. Meiertöns, T. M. Demke, R. Scheffler, M. Weber, M. Schmidt

**ZUSAMMENFASSUNG** Der Beitrag stellt einen Ansatz vor, mit dem das Potenzial energieorientierter Maßnahmen innerhalb der PPS bewertet werden kann. Um Zielkonflikte zwischen Energiekosten und logistischen Zielgrößen zu analysieren, werden ein Energie-, ein Scheduling- sowie ein Logistikmodell miteinander gekoppelt. Dieser Ansatz bildet die Basis für einen konzeptionellen Demonstrator, der Unternehmen bei der Bewertung von Maßnahmen zur Reduzierung der Energiekosten unterstützt, ohne die logistischen Zielgrößen zu gefährden.

## STICHWÖRTER

Energieeffizienz, PPS (Produktionsplanung), Produktionsmanagement

## Integrated model approach for energy-oriented PPC

**ABSTRACT** This article presents an approach that can be used for evaluating the potential of energy-related measures within PPC. To analyze conflicting targets of energy costs and logistical objectives, an energy model, a scheduling model, and a logistics model are coupled. This approach forms the basis for a conceptual demonstrator that supports companies in evaluating measures to reduce energy costs without compromising logistical performance.

## 1 Motivation

Elektrische Energie wird in der Produktion zunehmend steuerungsrelevant, da schwankende Strompreise, leistungsabhängige Tarifstrukturen und eine volatilere Stromverfügbarkeit die operative Produktionssteuerung beeinflussen. In Anbetracht eines im Jahr 2024 weltweit um rund 4 % gestiegenen industriellen Stromverbrauchs, von dem nahezu 40 % auf die Industrie entfielen, gewinnt diese Entwicklung weiter an Relevanz [1]. Die Industrie ist zugleich mit 37 % größter Endenergieverbraucher, sodass Effizienz- und Flexibilitätshebel unmittelbar kostenwirksam sind [2]. Dabei nimmt die Elektrifizierung strukturell zu: Der Stromanteil an der Endenergie liegt aktuell bei etwa 20 % und steigt in Szenarien bis 2030 auf über 27 % [3].

Mit wachsendem Anteil wetterabhängiger Energieerzeugung verändern sich Preisprofile. Analysen zeigen in den europäischen Strommärkten ausgeprägte Volatilitäten innerhalb weniger Tage und innerhalb der Tagesverläufe [4]. Diese Preisprofile setzen betriebswirtschaftliche Anreize, energieintensive Arbeitsschritte beispielsweise zeitlich zu verlagern, wie die Literatur zu zeitvariablen Tarifen und dynamischer Bepreisung zeigt [5]. Solche Verlagerungen beeinflussen unter anderem die Termintreue, die Durchlaufzeit, die Auslastung und den Bestand.

Dies führt zu Zielkonflikten zwischen energieorientierten und logistischen Zielgrößen. Wird etwa der Energieverbrauch in der

Auftragsabwicklung priorisiert, nehmen Verspätungen von energieintensiven Aufträgen zu, was die Termintreue negativ beeinflusst [6, 7]. Ohne die integrierte Bewertung von Energieflexibilitätsmaßnahmen (EFM) und deren Auswirkungen auf logistische Zielgrößen könnten zwar Energiekosten eingespart, aber logistische Ziele verfehlt werden. Gao *et al.* [8] hoben deshalb in ihrem Überblick über die energieeffiziente Terminplanung in intelligenten Produktionssystemen die multikriteriellen Schedulingansätze unter den energieorientierten als sinnvoll hervor. Es resultiert die Frage, wie sich potenzielle Kosteneinsparungen durch EFM hinsichtlich deren Wirkung auf logistische Zielgrößen valide bewerten lassen [9].

Der vorliegende Beitrag adressiert diese Fragestellung unter Verwendung einer Modellarchitektur, die ein Energie-, ein Scheduling- und ein Logistikmodell miteinander koppelt. Der Schwerpunkt liegt auf der Beschreibung von Schnittstellen zwischen den drei Modellen, um deren Zusammenwirken zwischen Energie- und Logistikgrößen genauer darzustellen und die Basis für eine energieorientierte Produktionsplanung und -steuerung (PPS) zu schaffen. Diese zusammenhängende dreiteilige Modellierung wird in der Literatur zur systematischen Verbindung von energieorientierten und logistischen Zielgrößen bereits umrissen [10]. Aufbauend auf dieser Modellierung wird ein konzeptioneller Demonstrator skizziert, der es produzierenden Unternehmen, vor allem kleinen und mittleren Unternehmen (KMU), erlauben soll,

durch Datenerfassung, Maßnahmenwahl und Szenarienvergleich zu kennzahlbasierten Entscheidungen zu gelangen und damit eine zielgerichtete Entscheidungsunterstützung zu erhalten [11, 12].

## 2 Methodik

Für ein besseres Verständnis der folgenden Inhalte zu den Schnittstellen zwischen Energie-, Scheduling- und Logistikmodell wird der Ansatz zur Potenzialbewertung von EFM zunächst zusammengefasst. Initial werden die Anforderungen an den Untersuchungsrahmen bestimmt, indem Einflüsse der Energiemärkte, des Netzbezugs und der Eigenerzeugung sowie logistischer Infrastrukturen erfasst, bestehende energieorientierte PPS-Verfahren systematisch aufgearbeitet und Unternehmensbefragungen zu praktischen Fragestellungen hinsichtlich der Energieflexibilität durchgeführt werden. Darauf aufbauend erfolgt die Modellierung der drei Modelle, um die Wirkzusammenhänge zwischen EFM sowie relevanten Energie- und Logistikgrößen ableiten zu können.

Das Energiemodell liefert Eingangsgrößen bezüglich Energiebedarfe sowie -beschaffung und verarbeitet Ergebnisse aus dem Schedulingmodell zu resultierenden Energiekosten. Das Schedulingmodell dient als Ablaufsimulation zur vergleichenden Untersuchung verschiedener Szenarien für energie- und logistikorientierte Einflussgrößen und Produktionssystemkonfigurationen. Das Logistikmodell bildet auf der Basis des Schedulingmodells Ursache-Wirkungs-Beziehungen zwischen den relevanten EFM und Logistikgrößen ab. Für die Überführung der Erkenntnisse zu den bestehenden Wirkzusammenhängen in die Praxis wird ein Demonstrator konzipiert, der es KMU ermöglicht, das Potenzial durch die Anwendung von EFM auf unterschiedlichen Ebenen hinsichtlich Leistung und Kosten abzuschätzen.

Methodisch orientiert sich der Beitrag an dem Action-Design-Research-Prozess (ADR-Prozess) gemäß *Mullarkey* und *Hevner* [13]. Der ADR-Prozess ist eine Methodik, welche die Entwicklung eines Lösungsartefakts eng mit der Praxis verzahnt. Im Zentrum steht nicht nur ein funktionsfähiges Artefakt, sondern auch dessen Einsatz in einem realen Kontext, die systematische Beobachtung dessen Wirkung und die Ableitung verallgemeinerbarer Erkenntnisse. Der ADR-Prozess beginnt mit der Problemformulierung und Planung mittels Definition von Zielen und Bewertungskriterien. Dann folgt die Artefaktentwicklung vom Konzept über Modelle und Methoden bis zur Instanziierung, integriert in einen Innovationszyklus. In diesem Zyklus wird das Artefakt interaktiv konstruiert, im Anwendungskontext eingesetzt und auf seine Wirkungen evaluiert. Die Evaluationsergebnisse fließen unmittelbar in die nächste Iteration ein. Es schließen sich Reflexion und Lernen an: Die Beobachtungen werden systematisiert und in umsetzbare Leitlinien und allgemeine Verfahren überführt.

Das Zusammenwirken der drei Modelle wird in diesem Beitrag durch die Entwicklung eines konzeptionellen Modellschemas transparent gemacht. Ausgehend vom ADR-Prozess wird ein anwendungsorientiertes Modellschema, welches die drei Teilmodelle sowie Ziele und Bewertungskriterien formal beschreibt, in Anlehnung an die Struktur eines Input-Prozess-Output-Modells entwickelt [14]. Der Fokus liegt auf der systematischen Strukturierung der Modellkopplung und der formalen Beschreibung der Wirkzusammenhänge zwischen energiebezogenen und logistischen Zielgrößen im Rahmen einer energieorientierten PPS.

## 3 Übergreifendes Modellschema und Spezifikation der Teilmodelle

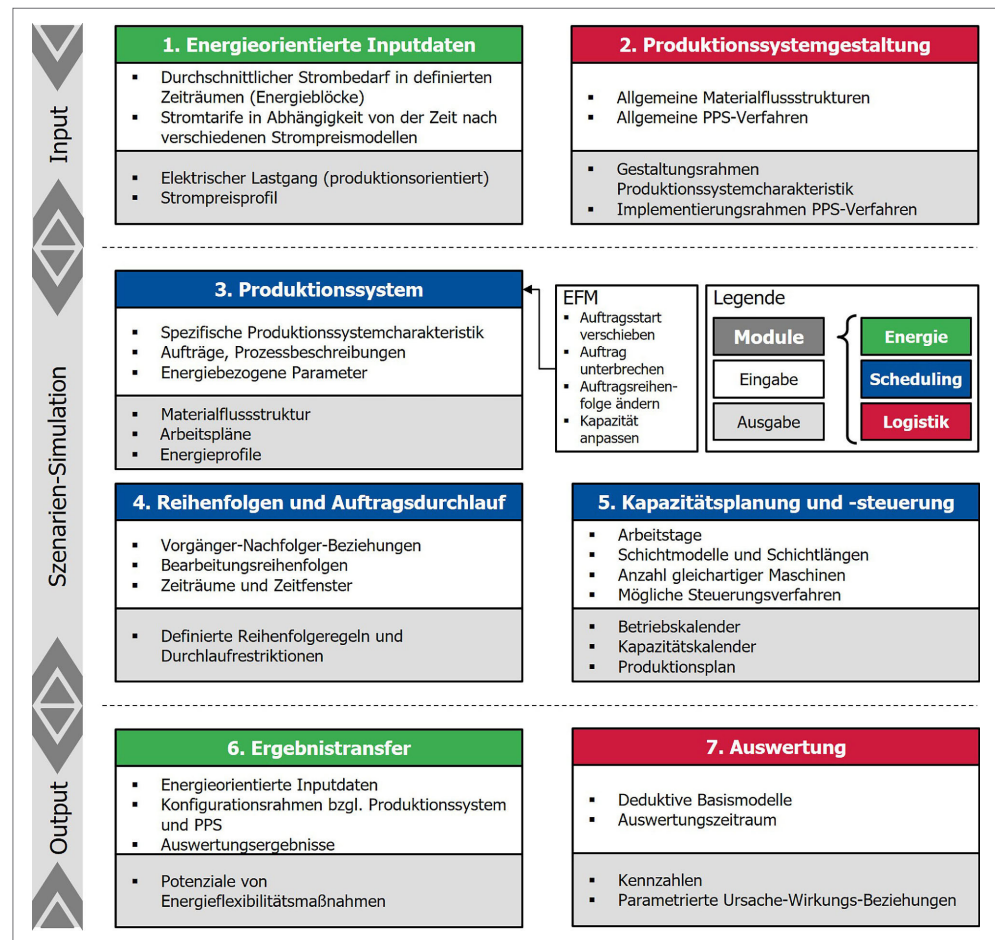
Die Architektur des übergreifenden Modellschemas umfasst die Teilmodelle und zeigt die Schnittstellen zwischen ihnen auf. Ziel dieses Kapitels ist die konsistente Darstellung von Struktur, Datenflüssen und Verantwortlichkeiten als Grundlage für die nachfolgenden Detailbeschreibungen. In Anlehnung an *Seitz* [15] visualisiert **Bild 1** das Modellschema mit sieben Modulen. Dieser Aufbau knüpft direkt an den ersten Schritt des zuvor beschriebenen Ansatzes zur Untersuchung der Auswirkungen einer energieorientierten PPS auf Energie- und Logistikgrößen an.

Anhand des definierten Untersuchungsrahmens werden die energieorientierten Inputdaten (Modul 1) im Energiemodell spezifiziert und der Gestaltungs- und Implementierungsrahmen für das Produktionssystem und das PPS-Verfahren in der Produktionssystemgestaltung (Modul 2) im Logistikmodell festgelegt. Diese beiden Module decken somit die Problemformulierung und Planung als ersten Schritt des ADR-Prozesses ab. Des Weiteren werden die relevanten Kostenfaktoren als Inputdaten modelliert, wie etwa Stromtarife, Energiebedarfe und Personalkosten.

Den zweiten Schritt des ADR-Prozesses, die Artefaktentwicklung, bildet das Schedulingmodell. Die aus Modul 1 und 2 resultierenden Inputdaten werden in eine Ablaufsimulation überführt, in der die Auftragsabwicklung innerhalb eines durch Modul 3 spezifizierten Produktionssystems abgebildet und durch die PPS koordiniert wird. Innerhalb des Schedulingmodells werden über die Aufgaben der PPS die zu untersuchenden EFM integriert. Die Module 4 und 5 ermöglichen in diesem ersten Innovationszyklus die Untersuchung der EFM nach VDI 5207 [16]. Um die energieorientierte Gestaltung der Modelle zu strukturieren, werden die folgenden vier EFM herangezogen:

- Auftragsstart verschieben: zeitliche Verlagerung energieintensiver Aufträge in tariflich günstige Zeitfenster. Das Lastprofil bleibt gleich und der Auftrag wird vorzeitig oder verzögert begonnen.
- Auftrag unterbrechen: geplante Pausen oder Stillstände innerhalb von Produktionsprozessen zur Vermeidung von Lastspitzen in teuren Tarifzeiten, mit dem Ziel einer verbesserten Laststeuerung und Kostenreduktion. Das Lastprofil bleibt ähnlich, wird aber gezielt durch eine Lastkurve nahe oder gleich Null zeitlich unterbrochen und über die Unterbrechungsdauer gestreckt.
- Auftragsreihenfolge ändern: Priorisierung von Aufträgen mit hohem Energiebedarf in Niedrigpreissphasen. Das Lastprofil ändert sich, da die unterschiedlichen Amplituden verschieden energieintensiver Produkte für ein Lastmanagement genutzt werden.
- Kapazität anpassen: flexible Steuerung von Maschinenlaufzeiten und Personalressourcen zur Glättung von Lastspitzen und optimaler Nutzung preisgünstiger Energiephasen. Hier sind verschiedene Verhalten von Lastprofilen möglich. Zum Beispiel lässt sich durch einen verlagerten Ressourceneinsatz, etwa den sequenziellen statt parallelen Einsatz einer zusätzlichen Maschine, ein Auftrag langsamer fertigen, wobei das Lastprofil gezielt gestreckt wird.

Diese Auswahl wurde auf Grundlage initialer Befragungen von Unternehmen aus dem projektbegleitenden Ausschuss (PA) des Forschungsprojekts "PePPS" (siehe Förderhinweis am Ende) getroffen. Die vier ausgewählten EFM bilden praxisrelevante



**Bild 1** Übergreifendes Modell-schema. Grafik: [15], IFA

Hebel, mit denen Unternehmen auf die zunehmende Volatilität der Strompreise reagieren können. Gleichzeitig dienen sie als Orientierungsgrundlage für die energiemodellspezifischen Eingaben und Auswertungen in der nachfolgenden Modellarchitektur.

Der dritte Schritt des ADR-Prozesses wird zum einen durch den Ergebnistransfer (Modul 6) des Energiemodells abgebildet, welcher die Schritte Reflexion und Lernen des ADR-Prozesses adressiert, indem die Inputdaten und Auswertungen aus dem Schedulingmodell konsolidiert und in allgemeine Wirkungsmuster überführt werden. Darauf aufbauend werden Potenziale von EFM in Verbindung mit verallgemeinerten Gestaltungsleitlinien zur Auslegung der PPS ausgewiesen. Zum anderen erfolgt die Auswertung (Modul 7) des Logistikmodells, in der die Rückmeldedaten aus dem Schedulingmodell zusammengeführt und auf deren Basis die Ursache-Wirkungs-Beziehungen zwischen den relevanten Energie- und Logistikgrößen im Zusammenhang mit den jeweiligen EFM untersucht werden. Im Fokus stehen dabei insbesondere die Auswirkungen auf klassische Logistikgrößen wie Termintreue, Durchlaufzeit, Auslastung und Bestand, welche ebenfalls durch den PA bereitgestellt wurden.

### 3.1 Problemformulierung und Planung (Modul 1 und 2)

Modul 1 stellt die Datengrundlage der energieorientierten PPS dar und dient der systematischen Erfassung, Strukturierung und Aufbereitung aller energetischen Eingangsgrößen, welche für die Bewertung von EFM erforderlich sind. Ziel des Moduls ist es, die energetischen Eigenschaften energieflexibilisierbarer Prozesse

oder Aufträge so abzubilden, dass sie transparent in ein energieorientiertes Schedulingmodell integriert werden können. Die zentrale Eingangsgröße des Moduls ist der prozess-beziehungsweise auftragsbezogene elektrische Energiebedarf. Dieser wird über definierte Zeitschritte (wie 1-, 15- oder 60-Minuten-Intervalle) beschrieben und häufig in Form sogenannter Energieblöcke [17] modelliert, welche den durchschnittlichen Energiebedarf eines Prozesses innerhalb eines Zeitschritts abbilden. Abhängig vom Detaillierungsgrad können konstante Lastprofile, phasenabhängige Lastverläufe (wie Anfahr-, Produktions- und Abkühlphasen) oder variabel skalierbare Leistungsbedarfe berücksichtigt werden. Diese Lastinformationen bilden die Grundlage für die Bewertung zeitlicher Verschiebungen, Unterbrechungen oder Leistungsanpassungen im Rahmen von EFM.

Ergänzend werden im Modul 1 zeitabhängige Stromtarife und Preisstrukturen als weitere zentrale Inputdaten erfasst. Diese erlauben die Abbildung unterschiedlicher energiewirtschaftlicher Rahmenbedingungen, die maßgeblich die wirtschaftliche Attraktivität von EFM beeinflussen. Dabei können verschiedene Tarifvarianten berücksichtigt werden, wie beispielsweise:

- zeitlich konstante Stromtarife (etwa klassische Festpreistarife),
- zeitvariable Tarife wie Hoch-/Niedertarife (HT/NT), Tageszeit- oder Wochenzeittarife,
- dynamische Stromtarife, die sich an Spotmarktpreisen (zum Beispiel Day-Ahead- oder Intraday-Preisen) orientieren,
- Tarife mit Anreizen für Lastverschiebung, beispielsweise reduzierte Preise in Flexibilitätszeitfenstern oder bei netzdienlichem Verhalten.

Art der Auftragsabwicklung	Engineer-to-Order (EtO)	Make-to-Order (MtO)	Assemble-to-Order (AtO)	Make-to-Stock (Mts)	gemischt		
Fertigungsart	Fertigung			Montage			
Produktionsprinzip	Werkbankprinzip	Einzelplatz- / Baustellenprinzip	Werkstattprinzip	Inselprinzip	Fließprinzip		
Anzahl Bearbeitungsschritte	hoch	mittel		gering	gemischt		
Erzeugnisstruktur	mehrteilig mit komplexer Struktur	mehrteilig mit einfacher Struktur	geringteilig	einzelne Komponenten	gemischt		
Varianz der Arbeitsinhalte	hoch		mittel		gering		
Schwankungen des Kunden- und Kapazitätsbedarfs	hohe Nachfrageschwankung mit wechselnden Engpässen	hohe Nachfrageschwankung bei gleichbleibendem Engpass	gleichmäßige saisonale Schwankungen		geringe Nachfrageschwankungen		
Kapazitätsflexibilität	hoch		mittel		gering bis keine		
Belastungsflexibilität	hoch		mittel		gering bis keine		
Kapazitätssteuerung	starr	planorientiert	rückstandsorientiert	bestandsregelnd	leistungsmaximierend	energiegeregelt	
Auftragsfreigabe	sofortig	terminorientiert	bestandsregelnd	keine Vorgabe oder keine Freigabe erforderlich		energieorientiert	
Kapazitätsplanung	zeitliche Kapazitätsanpassung	intensitätsmäßige Kapazitätsanpassung	Belastungsabgleich	Belastungsanpassung	energie-dynamische Kapazitätsanpassung		
Reihenfolgebildung	nach Termin	rüstop-timierend	primär FIFO	nach Arbeitsinhalt	zur Steuerung von Beständen	keine Vorgabe	nach Energiebedarf

**Bild 2** Morphologisches Schema zur Charakterisierung eines Produktionssystems im Rahmen der Produktionssystemgestaltung. Grafik: [18], IFA

Die Stromtarife werden dabei nicht nur als eindimensionaler Energiepreis modelliert, sondern differenziert nach ihren Preisbestandteilen abgebildet. Insbesondere werden berücksichtigt:

- flexible Stromarbeitspreise [€/kWh], die zeitabhängig variieren und direkt mit dem Energieverbrauch der Prozesse verknüpft sind,
- Leistungspreise [€/kW], die sich auf die maximale bezogene elektrische Leistung innerhalb eines Abrechnungszeitraums beziehen,
- optional weitere Bestandteile wie Grundpreise, Netzentgelte oder Abgaben, sofern diese für die Flexibilitätsbewertung relevant sind.

Durch die explizite Modellierung von Arbeits- und Leistungspreisen können sowohl energiebezogene als auch leistungsbezogene Effekte im Schedulingmodell gezielt analysiert werden.

Als Ausgaben liefert Modul 1 zunächst den produktionsorientierten elektrischen Lastgang des betrachteten Prozesses oder Auftrags, der zeitdiskret und kompatibel zum gewählten Planungshorizont vorliegt. Dieser Lastgang ist die energetische Ausgangsbasis für nachgelagerte Module, vor allem für die Bewertung von EFM. Zusätzlich wird ein detailliertes Strompreisprofil ausgegeben, das die relevanten Preisbestandteile dynamisch abbildet. Damit schafft Modul 1 die notwendige Transparenz der energie- und kostenrelevanten Einflussgrößen. Es bildet die Schnittstelle zwischen energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen und energetischen Kenngrößen im Kontext einer energieorientierten PPS.

Das Modul 2 zur Produktionssystemgestaltung strukturiert den allgemeinen Gestaltungsrahmen für die betrachtete Produktion oder den Produktionsbereich. Die Basis für diesen bildet das von Härtel [18] anhand bestehender Literatur [19, 20] angepasste morphologische Schema zur Produktionssystemcharakterisierung. Die darin aufgeführten Kriterien erlauben eine Charakterisierung

der Auftragsabwicklungsstruktur sowie relevanter Einflussfaktoren für die PPS. Das morphologische Schema wurde adaptiert, um das Potenzial von EFM zu evaluieren. Im Zusammenhang mit der Auftragsabwicklungsstruktur wurden bestimmte Kriterien, die den Beschaffungsprozess, den Materialfluss, die Bestimmung der Plan-Durchlaufzeit und die Kundenänderungseinflüsse betreffen, außer Acht gelassen. Definitionen der Merkmalsausprägungen können Härtels Dissertation [18] entnommen werden. Mit Blick auf die PPS wurde die Morphologie um die Kapazitätssteuerung erweitert. Die Kriterien der Ressourcenplanung, Auftragsfreigabe, Reihenfolgebildung und Kapazitätssteuerung werden auf Basis der priorisierten EFM erweitert, welche nachfolgend beschrieben werden und in **Bild 2** farblich hervorgehoben sind.

Die Kapazitätssteuerung kann gemäß den folgenden Prinzipien durchgeführt werden: starr, planorientiert, rückstandsorientiert, bestandsregelnd oder leistungsmaximierend [21]. Die energieorientierte Kapazitätssteuerung ergänzt diese Verfahren, indem die bereitgestellten Kapazitäten für Prozesse erweitert oder abgebaut werden. **Bild 3** zeigt beispielhaft ein System, das Maschinenkapazität für drei Prozessschritte mit unterschiedlichen Energiebedarfen bereitstellt. Durch gezieltes Verschieben von Personalressourcen oder Neuanschaffung von energetisch sparsamen Maschinen ist es möglich, die maschinell bereitgestellten Kapazitäten vom energieintensiven Prozessschritt 3 zu verringern und für den energiearmen Prozessschritt 2 zu erhöhen.

Die Auftragsfreigabe kann unter Verwendung der folgenden klassischen Verfahren durchgeführt werden: sofort nach Bekanntwerden eines Auftrags, terminorientiert, bestandsorientiert, oder es ist keine Freigabe erforderlich [21]. Erweitert werden diese Verfahren durch die Berücksichtigung einer energieorientierten Auftragsfreigabe. Aufträge erhalten dabei ihren Freigabezeitpunkt anhand energierelevanter Kriterien, wie etwa des Energiebedarfs



diese Weise wird definiert, in welchen Zeitbereichen das System produktiv sein kann und mit welcher Intensität Ressourcen genutzt werden.

Die Optimierung der Ablaufplanung erfolgt als Erweiterung eines Mixed-Integer-Linear-Programming-Ansatzes (MILP) [24–26] unter Einsatz einer Software zur Simulation und Optimierung von Energiesystemen, mit der die Produktionsanlagen modelliert werden. Startzeiten, Zuordnungen zu Ressourcen und Belegungszustände werden als Entscheidungsvariablen formuliert, während die drei beschriebenen Module die Nebenbedingungen bereitstellen, etwa für Kapazitätsgrenzen, technologische Abfolgen, Kalender- und Schichtrestriktionen sowie energiebezogene Beschränkungen, beispielsweise die maximalen Anschlussleistungen. Rüstaufwände und das Anfahrverhalten von Anlagen werden gegenwärtig nicht betrachtet. Der Ablaufplan wird vollständig durch die Optimierung ermittelt, die Modellierung gibt lediglich den zulässigen Lösungsraum vor. Die Zielfunktion fokussiert primär die energiewirtschaftlichen Zielgrößen, insbesondere die Minimierung von Energiekosten und Lastspitzen. Logistische Kenngrößen wie Durchlaufzeiten oder Termintreue werden nur indirekt über Boni und Mali in der Zielfunktion berücksichtigt. Viele logistische Effekte werden ex post anhand der berechneten Ablaufpläne ausgewertet und sind nicht integraler Bestandteil der Optimierung (siehe Abschnitt 3.3).

Die EFM werden als zusätzliche Freiheitsgrade in der Ablaufplanung modelliert. Im Projekt stehen insbesondere vier Freiheitsgrade im Vordergrund: Erstens, die Verschiebung des Auftragsstarts innerhalb definierter Frühest- und Spätest-Termine, um energieintensive Arbeitsschritte in Zeitintervalle mit niedrigen Energiepreisen oder hoher Verfügbarkeit erneuerbarer Energie zu verlagern. Zweitens, die Unterbrechung des Prozesses, bei der bestimmte Bearbeitungsschritte kontrolliert pausiert und später fortgesetzt werden können, sofern dies prozessual und qualitätstechnisch zulässig ist (die zulässigen Unterbrechungsdauern und etwaige Zusatzkosten werden im Modell parametrisiert). Drittens, die Änderung der Auftragsreihenfolge auf einer Ressource, welche genutzt wird, um bei gleicher Kapazitätsauslastung Lastprofile zu glätten, Lastspitzen zu vermeiden und vorteilhafte Preisintervalle besser auszunutzen. Viertens, die Anpassung der Kapazitäten, etwa durch Zu- oder Abschalten paralleler Maschinen, die Anpassung von Schichtmodellen oder eine temporäre Leistungsreduktion, um die elektrische Last an die aktuelle Verfügbarkeit und Kostenstruktur der Energieversorgung anzupassen. In Optimierungsläufen mit aktivierten Freiheitsgraden wird jeweils ein optimaler Ablaufplan bestimmt, sodass die Effekte dieser EFM auf Energiekosten, Lastverläufe und nachgelagerte logistische Kennzahlen systematisch analysiert und bewertet werden können.

Durch die Anwendung des Modells auf konkrete Anwendungsfälle kann der Zusammenhang zwischen Modellparametern, EFM und Zielgrößen detailliert untersucht werden. Variationen von Energiebedarfen, Prozessketten, Anlagenstrukturen oder Schichtmodellen sowie der gezielte Einsatz verschiedener Flexibilitätsoptionen erlauben es, deren Einfluss auf Energiekosten, Lastprofile und abgeleitete logistische Kenngrößen systematisch zu quantifizieren. Auf dieser Basis lassen sich für spezifische Produktionssysteme wirksame Kombinationen von EFM identifizieren und robuste Handlungsempfehlungen für eine energieorientierte PPS ableiten.

### 3.3 Ergebnistransfer und Auswertung (Modul 6 und 7)

Modul 6 dient der Konsolidierung der Analyseergebnisse des integrierten energieorientierten Schedulingmodells. Es verknüpft die energieorientierten Inputdaten mit den Konfigurationsparametern des Produktionssystems sowie den Ergebnissen der Szenariosimulation. Ziel ist, die Potenziale von EFM transparent zu bewerten und verallgemeinerbare Gestaltungsleitlinien für die energieorientierte PPS abzuleiten. Im Fokus des Moduls steht die Analyse der Wirkzusammenhänge zwischen eingesetzten EFM und deren Auswirkungen auf energie- und logistikbezogene Kennzahlen. Dazu zählen vor allem Energiekosten, Produktionskosten sowie Liefertermin- und Durchlaufzeitkennzahlen. Die Ergebnisse werden vergleichend für unterschiedliche Planungsstrategien und Szenarien ausgewertet.

Zur Veranschaulichung der Methodik wird ein Praxisbeispiel aus dem projektbegleitenden Ausschuss des Forschungsprojekts herangezogen. Hierbei handelt es sich um die Auftragsplanung eines mehrstufigen Montage- und abschließenden Prüfprozesses in einem KMU der Energie- und Gebäudetechnikbranche. In dem Anwendungsszenario wurde eine energieorientierte Auftragsplanung einer konventionellen produktionsorientierten Planung gegenübergestellt. Die Hochrechnung zeigt ein Einsparpotenzial von rund 30 % bei den Energiekosten. Dieses Potenzial wird durch die gezielte Verlagerung energieintensiver Aufträge in Zeiträume mit niedrigen Strompreisen realisiert. Dabei werden bewusst höhere Personalkosten, etwa durch Wochenend- oder Nachtzuschläge, in Kauf genommen. Diese Mehrkosten werden durch die reduzierten Energiekosten überkompensiert. Gleichzeitig zeigen die Simulationsergebnisse, dass zentrale Logistikkennzahlen, wie die Einhaltung von Lieferterminen, weiterhin erfüllt werden.

Das Praxisbeispiel verdeutlicht, wie Ergebnisse aus dem Schedulingmodell genutzt werden können, um konkrete Potenziale von EFM quantitativ zu bewerten. Die dargestellte Potenzialabschätzung stellt eine erste Grobbewertung dar und wird im weiteren Projektverlauf durch detailliertere Analysen und zusätzliche Anwendungsszenarien konkretisiert.

Im letzten Modul des ganzheitlichen Modells erfolgt eine logistische Zielauswertung auf der Basis klassischer logistischer Zielgrößen wie Termintreue, Durchlaufzeit, Auslastung und Bestände [27], welche auf unterschiedlichen Systemebenen, beispielsweise der Arbeitssystem- oder Produktionsbereichsebene, analysiert werden. Die Vorgehensweise basiert auf der deduktiv-experimentellen Modellierung nach *Nyhuis* und *Wiendahl* [27]. Unter idealisierten Bedingungen werden zunächst relevante Ursache-Wirkungsbeziehungen zwischen energie- und logistikorientierten Stell-, Regel- und Zielgrößen im Kontext der betrachteten EFM deduktiv abgeleitet und formal beschrieben. Zur Veranschaulichung dieses deduktiven Vorgehens wird in **Bild 4** die Auswirkung der EFM „Auftragsstart vorziehen“ auf die logistischen Zielgrößen dargestellt.

Die zugrunde liegenden Erkenntnisse werden anschließend auf klassische Kennlinien nach *Nyhuis* und *Wiendahl* [27] übertragen. Für das vorliegende Beispiel wird auf ein klassisches Durchlaufdiagramm zurückgegriffen. Diese formalisierten Zusammenhänge bilden die Basis für die iterative Ausgestaltung der Simulationsstudien innerhalb des Schedulingmodells hinsichtlich geeigneter Input- und Outputgrößen. Die resultierenden Basismodelle werden danach experimentell mittels Ablaufsimulationen untersucht, wobei die erzeugten Kennzahlen zur Parametrisierung und Analy-

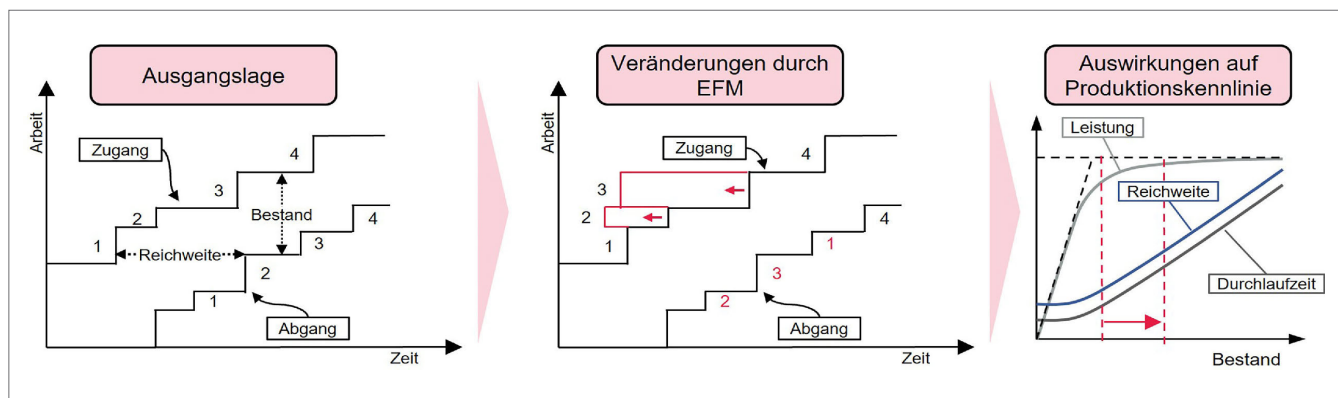


Bild 4 Deduktive Ableitung von Auswirkungen der Energieflexibilitätsmaßnahmen (EFM) auf logistische Zielgrößen. Grafik: IFA

se der identifizierten Ursache-Wirkungsbeziehungen zwischen energetischen und logistischen Zielgrößen herangezogen werden.

#### 4 Integration der Wirkzusammenhänge in den Anwendungsdemonstrator und Nutzen für Unternehmen/KMU

Die im Modell durch Optimierung ermittelten Wirkzusammenhänge zwischen Modellparametern, EFM und Zielgrößen bilden die fachliche Grundlage für einen Anwendungsdemonstrator für KMU. In diesem Demonstrator werden typische Strukturen von Produktions- und Energiesystemen sowie die daraus abgeleiteten Sensitivitäten so aufbereitet, dass KMU ohne tiefgehende Modellierungs- oder Optimierungskompetenz potenzielle EFM identifizieren und bewerten können. Ziel ist es, komplexe Zusammenhänge, wie den Einfluss von Energiebedarfen, Anlagenkonfigurationen und Schichtmodellen auf Energiekosten und logistische Kennzahlen, in eine praxistaugliche, leicht zugängliche Form zu überführen.

Der Demonstrator wird als einfach bedienbare Webanwendung konzipiert, in der Anwender ihr eigenes Produktions- und Energiesystem anhand weniger, gezielt ausgewählter Eingaben beschreiben. Dazu zählen etwa strukturelle Angaben zur Prozesskette und Anzahl wesentlicher Ressourcen, typische Lastniveaus und Energiebedarfe einzelner Prozessschritte, Informationen zu Schichtmodellen und verfügbaren Kapazitäten sowie relevante energiewirtschaftliche Rahmenbedingungen, wie Tarifstrukturen oder maximale Leistungsgrenzen. Die Auswahl und Detaillierung dieser Eingaben basiert unmittelbar auf den zuvor durchgeführten Optimierungen im Schedulingmodell und den anschließenden logistischen Auswertungen, aus denen hervorgeht, welche Parameter einen signifikanten Einfluss auf die Wirksamkeit und Wirtschaftlichkeit von EFM haben.

Anhand der vom Nutzer bereitgestellten Parameter verknüpft der Demonstrator das hinterlegte Wirkmodell mit typisierten Szenarien für EFM und leitet daraus konkrete, für das jeweilige KMU sinnvolle Empfehlungen ab. Dazu gehören insbesondere Vorschläge zu den in diesem Beitrag relevanten vier EFM, jeweils einschließlich einer qualitativen oder quantitativen Einschätzung des potenziellen Einflusses auf Energiekosten, Lastprofile und wesentliche logistische Kenngrößen. Die Optimierungsergebnisse aus dem Schedulingmodell dienen als Referenz, um zu bestimmen, unter welchen Randbedingungen bestimmte Flexibilitätsoptionen voraussichtlich wirksam oder wenig erfolgversprechend sind und welche Zielkonflikte zu erwarten sind.

Für KMU entsteht daraus ein niederschwelliger Zugang zu einem bislang forschungsintensiven Themenfeld: Anstatt selbst umfangreiche Modelle aufzubauen und Optimierungen durchzuführen, können sie mit begrenztem Eingabeaufwand verschiedene Flexibilitätsoptionen virtuell simulieren und deren potenziellen Nutzen abschätzen. Der Demonstrator unterstützt damit sowohl die Sensibilisierung für das Thema Energieflexibilität als auch die Priorisierung konkreter Maßnahmen, etwa als Vorbereitung für Investitionsentscheidungen oder Pilotprojekte.

#### 5 Fazit und Ausblick

Der vorliegende Beitrag adressiert die zunehmende Relevanz einer energieorientierten PPS vor dem Hintergrund steigender Elektrifizierung und volatiler Strompreise. Ziel war es, einen konzeptionellen Rahmen zur integrierten Bewertung von EFM zu entwickeln, der sowohl energieorientierte als auch logistische Zielgrößen berücksichtigt. Dazu wurde eine gekoppelte Modellarchitektur bestehend aus Energie-, Scheduling- und Logistikmodell vorgestellt und entlang eines übergreifenden Modellschemas strukturiert. Der Schwerpunkt lag auf der formalen Beschreibung der Schnittstellen zwischen den Teilmodellen sowie auf der transparenten Abbildung von Ursache-Wirkungs-Beziehungen zwischen EFM und relevanten Energie- und Logistikkennzahlen im Kontext einer energieorientierten PPS.

Das entwickelte Modellschema erlaubt es, EFM als zusätzliche Freiheitsgrade in der Ablaufplanung systematisch zu analysieren und deren Effekte konsistent zu bewerten. Durch die Kombination aus optimierungsbasierter Ablaufplanung, deduktiv abgeleiteten Wirkzusammenhängen und logistischer Zielauswertung wird ein methodischer Rahmen geschaffen, der bestehende Schedulingansätze um energetische und logistische Perspektiven erweitert. Die Ergebnisse bilden zugleich die fachliche Grundlage für einen Anwendungsdemonstrator, der die identifizierten Wirkzusammenhänge in abstrahierter Form für KMU nutzbar macht.

Aus den Erkenntnissen des Beitrags ergeben sich mehrere Ansatzpunkte zur Weiterentwicklung einer energieorientierten PPS. Ein zentraler Aspekt besteht in der Erweiterung des Modells um Unsicherheiten, etwa bei Energiepreisen, Auftragsankünften oder Prozesszeiten, um realitätsnähere Entscheidungssituationen abbilden zu können. Weiterführend bietet sich eine empirische Untersuchung der abgeleiteten Wirkzusammenhänge in unterschiedlichen Produktionssystemen an, um deren Generalisierbarkeit zu prüfen und zu schärfen. Schließlich stellt die Weiterentwicklung und Validierung des Demonstrators einen wichtigen Forschungs-

pfad dar, vor allem im Hinblick auf die nutzerorientierte Aufbereitung komplexer Modellzusammenhänge und deren Akzeptanz in der industriellen Praxis.

## FÖRDERHINWEIS

Das Projekt „Methode zur Potenzialbewertung energieorientierter Produktionsplanung und steuerung (PePPS)“ [01IF23359N] wird im Rahmen des Programms „Industrielle Gemeinschaftsforschung“ durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

## Literatur

- [1] IEA, International Energy Agency: Global Energy Review 2025. Internet: [www.iea.org/reports/global-energy-review-2025](http://www.iea.org/reports/global-energy-review-2025). Zugriff am 19.03.2026
- [2] IEA, International Energy Agency: Industry. Internet: [www.iea.org/energy-system/industry](http://www.iea.org/energy-system/industry). Zugriff am 19.03.2026
- [3] IEA, International Energy Agency: Electricity. Internet: [www.iea.org/energy-system/electricity](http://www.iea.org/energy-system/electricity). Zugriff am 19.03.2026
- [4] Pavlík, M.; Kurimský, F.; Ševc, K.: Renewable Energy and Price Stability: An Analysis of Volatility and Market Shifts in the European Electricity Sector (2015–2025). *Applied Sciences* 15 (2025) 12, #6397
- [5] Blaschke, M. J.: Dynamic pricing of electricity: Enabling demand response in domestic households. *Energy Policy* 164 (2022), #112878
- [6] Mouzon, G.; Yildirim, M. B.: A framework to minimise total energy consumption and total tardiness on a single machine. *International Journal of Sustainable Engineering* 1 (2008) 2, pp. 105–116
- [7] Wu, X.; Guo, P.; Wang, Y. et al.: Decomposition approaches for parallel machine scheduling of step-deteriorating jobs to minimize total tardiness and energy consumption. *Complex & Intelligent Systems* 8 (2022) 2, pp. 1339–1354
- [8] Gao, K.; Huang, Y.; Sadollah, A. et al.: A review of energy-efficient scheduling in intelligent production systems. *Complex & Intelligent-Systems* 6 (2020) 2, pp. 237–249
- [9] Arica, E.; Ogorodnyk, O.; Ranaboldo, M. et al.: A framework for designing a decision support system for energy aware production planning and scheduling. *Procedia CIRP* 138 (2026), pp. 927–932
- [10] Shao, Z.; Li, W.; Tan, Y. et al.: A systematic energy-aware scheduling framework for manufacturing factories integrated with renewables. *International Journal of Production Research* 62 (2024) 21, pp. 7644–7659
- [11] Plitsos, S.; Repoussis, P. P.; Mourtos, I. et al.: Energy-aware decision support for production scheduling. *Decision Support Systems* 93 (2017), pp. 88–97
- [12] Rischmann, M.; Weber, M.; Hiller, T. et al.: Scientific Concept for Analyzing the Potential of Energy-Oriented Production Planning and Control in SMEs. In: Mizuyama, H.; Morinaga, E.; Nonaka, T. et al. (eds.): *Advances in Production Management Systems. Cyber-Physical-Human Production Systems: Human-AI Collaboration and Beyond*. Cham: Springer Nature Switzerland 2025
- [13] Mullarkey, M. T.; Hevner, A. R.: An elaborated action design research process model. *European Journal of Information Systems* 28 (2019) 1, pp. 6–20
- [14] Davis, W. S.; Yen, D. C.: *The Information System Consultant's Handbook*. Boca Raton, Florida: CRC Press 2019
- [15] Seitz, M.: Datenbasierte Analyse und Prognose des logistischen Systemverhaltens in Produktionsbereichen mit komplexen Materialflüssen. Dissertation, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, 2021
- [16] VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V.: VDI-Richtlinie 5207 Blatt 1. *Energieflexible Fabrik – Grundlagen*. Ausgabe Juli 2020
- [17] Weinert, N.: Vorgehensweise für Planung und Betrieb energieeffizienter Produktionssysteme. Dissertation, Technische Universität Berlin, 2010
- [18] Härtel, L.: Modellbasierte Datenanalyse zur Identifikation logistischer Schwachstellen in Produktionsbereichen. Dissertation, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, 2021
- [19] Schuh, G.; Stich, V. (Hrsg.): *Produktionsplanung und -steuerung*. Heidelberg: Springer Vieweg 2012
- [20] Lödding, H.: *Verfahren der Fertigungssteuerung*. Heidelberg: Springer 2016
- [21] Schmidt, M.; Nyhuis, P.: *Produktionsplanung und -steuerung im Hannoveraner Lieferkettenmodell. Innerbetrieblicher Abgleich logistischer Zielgrößen*. Heidelberg: Springer Vieweg 2021
- [22] Stöppler, S.: *Nachfrageprognose und Produktionsplanung bei saisonalen und konjunkturellen Schwankungen*. Heidelberg: Physica-Verlag HD 1984
- [23] Haupt, R.: *Produktionstheorie und Ablaufmanagement*. Stuttgart: Poeschel Verlag 1987
- [24] Augenstein, E. M. G.: *Rechnergestützte Analyse und Konzeption industrieller Energiesysteme*. Dissertation, TH Aachen, 2009
- [25] Kansara, R.; Roldán Serrano, M. I.: Coupled Design and Operation Optimization for Decarbonization of Industrial Energy Systems Using an Open-Source In-House Tool. *Eng* 5 (2024) 4, pp. 3033–3048, <https://doi.org/10.3390/eng5040158>
- [26] Bauer, T.; Prenzel, M.; Klasing, F. et al.: Ideal-Typical Utility Infrastructure at Chemical Sites – Definition, Operation and Defossilization. *Chemie Ingenieur Technik* 94 (2022) 6, pp. 840–851
- [27] Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P.: *Logistische Kennlinien. Grundlagen, Werkzeuge und Anwendungen*. Heidelberg: Springer Vieweg 2012

**Mark Meiertöns, M.Sc.**   
meiertoes@ifa.uni-hannover.de

**Tabea Marie Demke, M.Sc.** 

**Prof. Dr.-Ing. habil. Matthias Schmidt** 

Leibniz Universität Hannover  
Institut für Fabrikanlagen und Logistik IFA  
An der Universität 2, 30823 Garbsen  
[www.ifa.uni-hannover.de/de](http://www.ifa.uni-hannover.de/de)

**Dipl.-Inf. Robert Scheffler** 

Gesellschaft zur Förderung  
angewandter Informatik e.V.  
Volmerstr. 3, 12489 Berlin  
[www.gfai.de](http://www.gfai.de)

**Markus Weber, M.Eng.** 

Fraunhofer-Institut für Gießerei-, Composite-  
und Verarbeitungstechnik IGCV  
Am Technologiezentrum 2, 86159 Augsburg  
[www.igcv.fraunhofer.de](http://www.igcv.fraunhofer.de)