

## Methode zur Erfassung des Energieflexibilitätspotenzials und -maßnahmen

# Energieflexibilität in der Matrixproduktion

K. Torolsan, M. Schmalzried, A. Sauer

**ZUSAMMENFASSUNG** Matrixproduktionssysteme sind modular aufgebaut und flexibel steuerbar. Für die Steuerung des Energiebedarfs auf der Nachfrageseite kann mit diesen Eigenschaften das große Potenzial der Energieflexibilität genutzt werden. Hierfür wird eine Methode zur Erfassung des Energieflexibilitätspotenzials und der Ableitung von Energieflexibilitätsmaßnahmen in cyber-physischen Matrixproduktionssystemen entwickelt. Organisatorische Energieflexibilität steht im Mittelpunkt.

## STICHWÖRTER

Energieeffizienz, Flexible Fertigungssysteme, Produktionsmanagement

## Energy flexibility in matrix production - Method for assessing the potential for energy flexibility and determining energy flexibility measures

**ABSTRACT** Matrix production systems are structured in a modular fashion and exhibit flexible controllability. With respect to managing energy consumption on the demand side, these features offer substantial potential for energy flexibility. In this context, a method is developed to assess energy flexibility potential and derive energy flexibility measures within cyber-physical matrix production systems with a focus on organizational energy flexibility.

## 1 Ausgangssituation und Überblick

Deutschland legte erstmals im Jahr 2000 den Anteil erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung fest, zuletzt auf 80 % bis zum Jahr 2030 [1, 2]. Die Integration der erneuerbaren Energien fordert Flexibilität als Reaktion auf die fluktuierende Erzeugungskonstanz, besonders in der Industrie, die mit 44 % im Jahr 2021 einen großen Anteil am Gesamtverbrauch hatte [3, 4].

Zuletzt entwickelten sich Produktionssysteme, welche digitale Technologien mit physischen Prozessen vereinen und somit die Flexibilität der Produktionssysteme steigern [5, 6]. Diese Systeme erlauben Anpassungen der Betriebsmuster an externe Faktoren und bieten somit Möglichkeiten zur Flexibilisierung des Energiebedarfs [7]. Dafür eignen sich vor allem cyber-physische Matrixproduktionssysteme (CP-MP). Sie sind modular aufgebaut, rekonfigurierbar und verfügen über ausgereifte, automatisierte Steuerungssysteme [8]. Diese Eigenschaften lassen sich für das Aggregieren von organisatorischer Energieflexibilität nutzen [9]. Es sind geeignete Prozesse zur Erhöhung der Energieflexibilität der CP-MP nötig, die gleichzeitig nicht im Konflikt mit den Produktionszielen der Unternehmen stehen. Dafür wird eine Methode zur Erfassung des Energieflexibilitätspotenzials (EFP) und der Ableitung von organisatorischen Energieflexibilitätsmaßnahmen (EFM) in CP-MP entwickelt.

### 1.1 Energieflexibilität der Nachfrageseite

Produktionssysteme können ihre Flexibilität einsetzen, um die Energiedifferenz zwischen Erzeuger- und Verbraucherseite zu

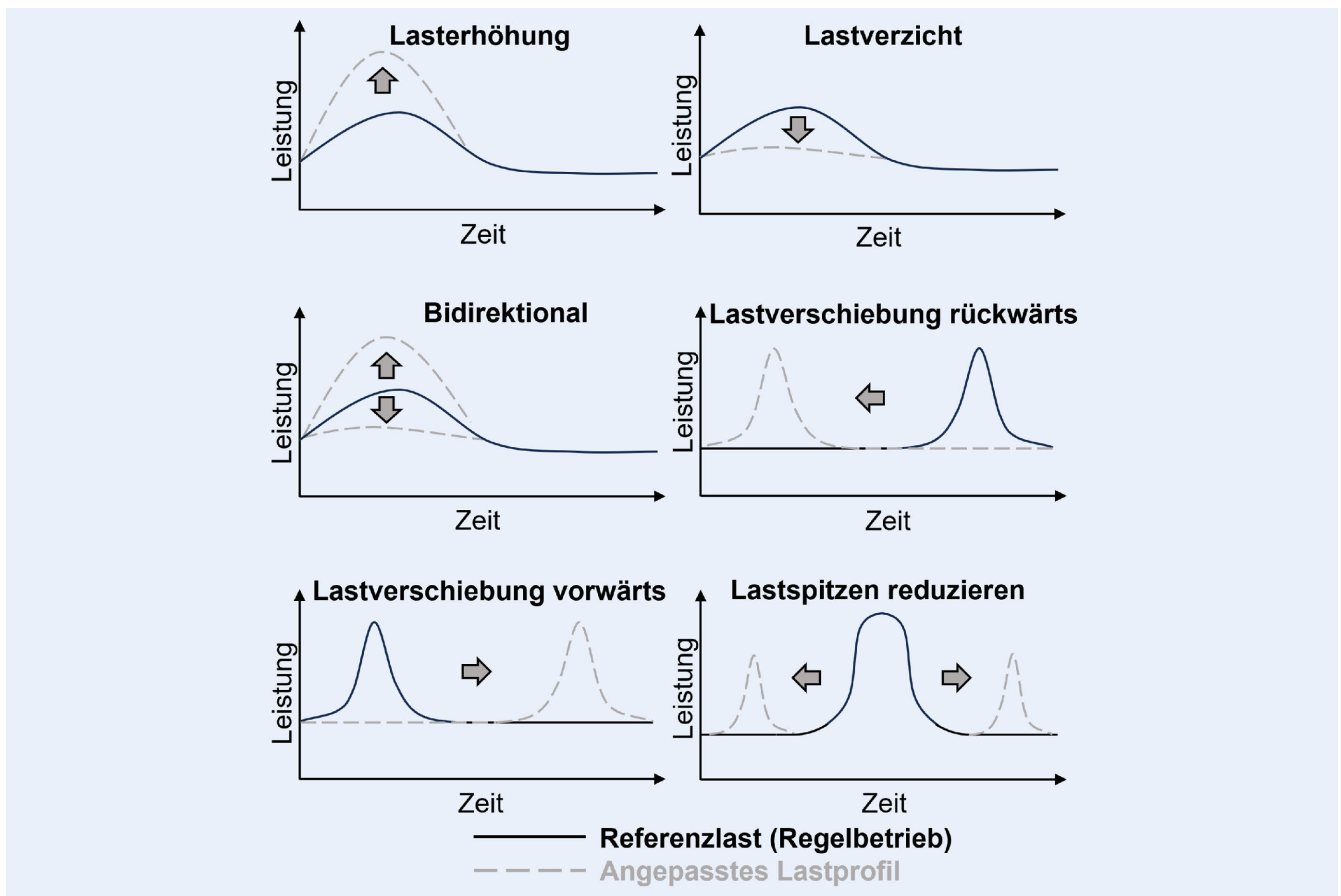
überbrücken [10]. Die Energieflexibilität der Nachfrageseite beschreibt die Fähigkeit eines industriellen Systems, schnell, flexibel und kosteneffizient auf Änderungen des Energiemarktes zu reagieren [11].

Das vorhandene EFP innerhalb eines Produktionssystems wird im Vorfeld identifiziert. Es beschreibt die Fähigkeit eines Produktionssystems, Lastgänge des Regelbetriebs zu verschieben oder im Betrag zu verändern [12].

Dieses Potenzial kann daraufhin durch EFM umgesetzt werden [9]. So entstehen reale Auswirkungen auf den Energiebedarf des Produktionssystems [13]. EFM lassen sich in technische und organisatorische Maßnahmen einteilen [9]. Die verschiedenen Arten der Lastanpassung durch EFM können nach ihrer Richtung unterteilt werden [9]. **Bild 1** stellt die Arten der EFM dar.

### 1.2 Cyber-physische Matrixproduktionssysteme

Matrixproduktionssysteme gewährleisten eine hohe Veränderungsfähigkeit im volatilen Wirtschaftsumfeld [14]. Ein Matrixproduktionssystem ist räumlich in einem Raster aufgebaut. Die Stationen sind frei anfahrbar und logistisch individuell planbar. Dadurch können mehrere Produkte parallel auf verschiedenen Produktionspfaden hergestellt werden [15, 16]. Matrixproduktionssysteme besitzen eine hohe Flexibilität, Rekonfigurierbarkeit und Umrüstbarkeit [16]. So können verschiedene Produktgruppen in variablen Ausbringungsmengen gefertigt werden [8]. Die cyber-physischen Matrixproduktionssysteme (CP-MP) zeichnen sich durch sehr hohe Reifegrade in Struktur und Steuerung aus [8].



**Bild 1.** Arten der Lastanpassung durch Energieflexibilitätsmaßnahmen. Grafik: angelehnt an [9]

Die Gestaltung des Produktionsablaufs lässt sich mit diesen Eigenschaften stark flexibilisieren.

## 2 Stand der Technik

In der Literatur existieren bereits Methoden zur Erfassung des EFP und der Ableitung von EFM in Produktionssystemen. Genauer untersucht wurden Publikationen des VDI [17] sowie von Grassl [12], Unterberger [18] und Tristán *et al.* [9].

Es lässt sich ein allgemeiner kongruenter Ablauf der Methoden in vier aufeinanderfolgenden Schritten identifizieren: Datenaufnahme, Datenbewertung, Auswahl möglicher EFM und die Analyse und Charakterisierung der EFM.

Die VDI-Norm 5207 Blatt 2 [17] bietet eine allgemeingültige Methode. Die detaillierte Analyse des Produktionssystems und der Stationen ermöglicht eine hohe Genauigkeit der Bestimmung von Energieflexibilitätspotenzialen.

Die Dissertation von Grassl [12] umfasst sechs Schritte zur Bewertung der Energieflexibilität. Dieses Vorgehen wird zur Einordnung des Systems und der Stationen eingesetzt und erlaubt es, EFM durch Kennzahlen zu quantifizieren. Durch die schrittweise Vorgehensweise wird die Komplexität der Anwendung gemindert.

Die Methode von Unterberger [18] fokussiert auf die Erfassung des EFP und die Ableitung von EFM für die Neugestaltung von Produktionssystemen. Diese Methodik sieht aufwendige Analyseschritte vor. Somit ist diese Methode nur mit hohem Planungsaufwand realisierbar, führt aber zu genauen Ergebnissen.

Tristán *et al.* führen in ihrer Publikation [9] acht Schritte zur Erfassung des EFP und der Ableitung von EFM ein. Zur Einordnung des Produktionssystems werden umfangreiche Charakteristika berücksichtigt. Dementsprechend zeichnet sich die Methodik durch eine einfache Anwendbarkeit bei gleichzeitig genauen Ergebnissen aus.

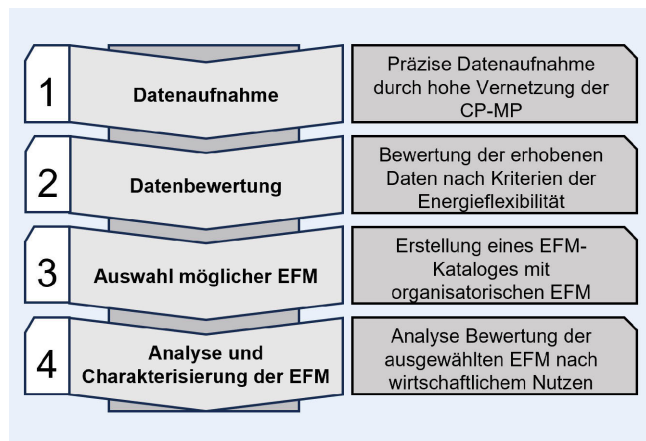
### 2.1 Ableitung des Forschungsbedarfes

Obwohl einige bestehende Methoden exakte Ergebnisse hervorbringen, werden die spezifischen Merkmale von CP-MP nicht vollständig berücksichtigt. Diese zeichnen sich durch eine hohe Reife in Struktur und Steuerung aus und bieten erhebliches Potenzial für die Erschließung von Energieflexibilität [8]. Demnach gilt es, eine Methode zu entwickeln, welche die spezifischen Merkmale der CP-MP vollständig abbildet.

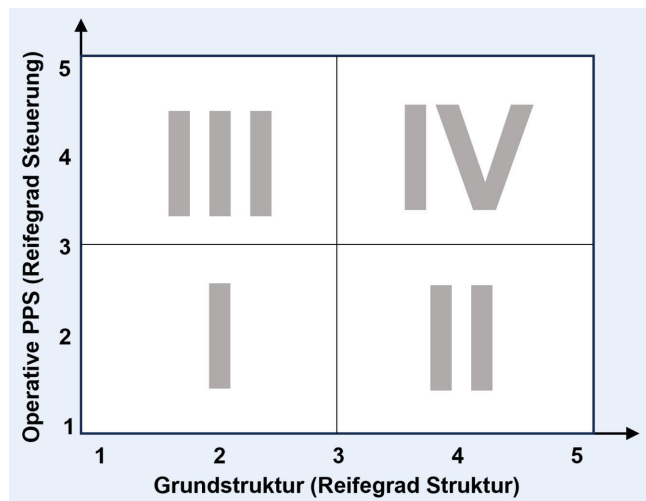
Die Methode fokussiert auf organisatorische Maßnahmen, da diese von den steuerungs- und strukturbedingten Freiheitsgraden der CP-MP erheblich profitieren [8, 9].

## 3 Erfassung Energieflexibilitätspotenzial und Ableitung von EFM in CP-MP

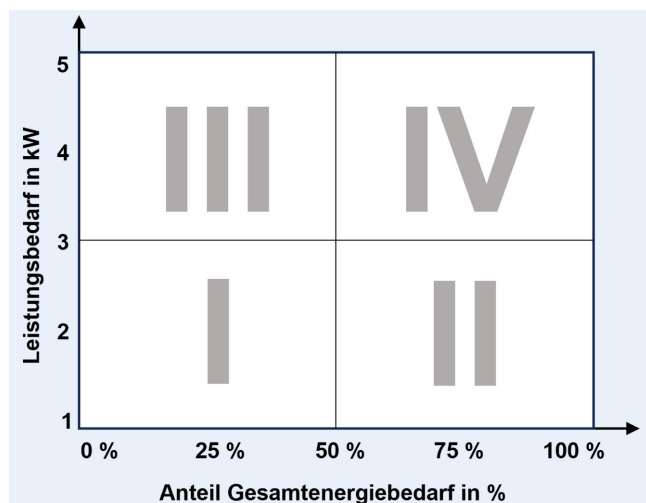
Nachfolgend wird die Methode zur Erfassung des Energieflexibilitätspotenzials (EFP) und der Ableitung von Energieflexibilitätsmaßnahmen (EFM) in cyber-physischen Matrixproduktionssystemen (CP-MP) vorgestellt. Dabei orientiert sich die



**Bild 2.** Struktureller Aufbau der Methode zur Erfassung des Energieflexibilitätspotenzials und der Ableitung von Energieflexibilitätsmaßnahmen in cyber-physischen Matrixproduktionssystemen. Grafik: Fraunhofer IPA



**Bild 3.** Einordnungsmatrix zur Produktionssystembewertung. Grafik: angelehnt an [12]



**Bild 4.** Einordnungsmatrix zur Vorauswahl geeigneter Stationen. Grafik: angelehnt an [12]

Abfolge der Methode an den Erkenntnissen aus dem Stand der Technik, wie in **Bild 2** dargestellt.

### 3.1 Datenaufnahme in cyber-physischen Matrixproduktionssystemen (CP-MP)

Je nach Reifegrad der Steuerung des vorliegenden CP-MP lässt sich die Datenaufnahme mit geringem Aufwand durchführen [8]. Die Vernetzung der Elemente durch cyber-physische Systeme bietet eine hohe Verfügbarkeit von Echtzeitdaten [8]. Dementsprechend können relevante Parameter, die zur Beurteilung des Energieflexibilitätspotenzials einbezogen werden, aus den Datenverwaltungssystemen ausgelesen werden.

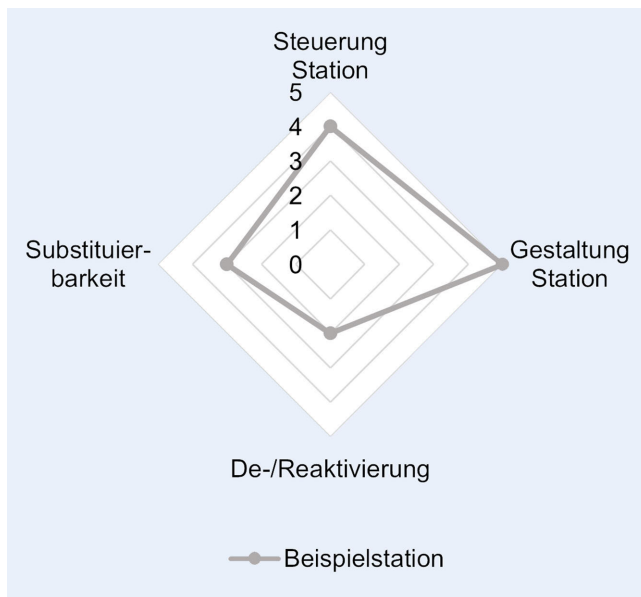
### 3.2 Datenbewertung

Das Produktionssystem und die Stationen werden mit Einordnungsverfahren so bewertet, dass eine Priorisierung der EFM durch deren spezifische Anforderungen im Nachgang möglich ist. Als Bewertungsgrundlage dienen bei der Datenaufnahme erhobene Reifegrade der CP-MP. Dabei sind höhere Reifegrade mit einer höheren Eignung für die Durchführung von EFM gleichzusetzen. Die Bewertungsskala berücksichtigt dabei Punktzahlen zwischen eins und fünf. Dieses Punktesystem wurde ausgewählt, um die Bewertung seitens des Anwenders greifbarer zu machen. In **Bild 3** wird der Reifegrad der operativen Produktionsplanung und -steuerung (Reifegrad Steuerung) und der Reifegrad der Grundstruktur bewertet [8]. Die Bewertung erfolgt in vier Quadranten [12]. CP-MP im IV. Quadranten sind demnach geeigneter für einen energieflexiblen Betrieb.

Um eine höhere Wirksamkeit der Maßnahmen zu erreichen, werden Stationen bevorzugt, die stark am Gesamtenergiebedarf des Produktionssystems beteiligt sind. So zeigt **Bild 4** die Einordnung nach prozentualem Energiebedarf am Gesamtverbrauch des Produktionssystems gemäß [12]. Als weiteres Kriterium wird der Leistungsbedarf bewertet. Dabei sind Stationen in den Quadranten II und IV generell zum energieflexiblen Betrieb geeignet [12].

Zudem werden die Stationen nach Existenz des EFP eingeordnet. Dazu wurde ein weiteres Einordnungsverfahren entwickelt, das verschiedene Kriterien berücksichtigt, welche für das EFP relevant sind. Dazu gehören:

- Reifegrad Steuerung Fertigungsinsel [8]  
Dieses Kriterium beschreibt die Einbindung einer Anlage in übergeordnete Steuerungs- und Leitsysteme durch Schnittstellen.
- Reifegrad Gestaltung Fertigungsinsel [8]  
Die Gestaltung der Fertigungsinsel umfasst die Fähigkeit einer Anlage, unterschiedliche Ressourcen und Aufgaben durch einen modularen Grundaufbau bewältigen zu können. Dieses Kriterium beschreibt die Rekonfigurierbarkeit einer einzelnen Anlage.
- Re-/Deaktivierung [9]  
Hierunter wird die Dauer der Hochfahr- beziehungsweise der Abklingvorgänge einer Anlage bei einem Zustandswechsel verstanden.
- Substituierbarkeit [9]  
Die Substituierbarkeit einer Anlage beschreibt die Verfügbarkeit von anderen Anlagen innerhalb des Produktionssystems, die gleiche oder teilweise gleiche Bearbeitungsprozesse durchführen können.



**Bild 5.** Netzdiagramm zur Stationsbewertung hinsichtlich der Existenz des Energieflexibilitätspotenzials. Grafik: angelehnt an [8, 9]

In **Bild 5** wurde beispielhaft eine Station mit dem Netzdiagramm bewertet. Dabei berücksichtigt die Bewertungsskala Punktezahlen zwischen null und fünf nach ansteigender Erfüllung des jeweiligen Kriteriums.

### 3.3 Auswahl und Priorisierung geeigneter Energieflexibilitätsmaßnahmen

Auf Basis der Datenbewertung werden nun geeignete EFM ausgewählt. Dafür wird ein Katalog aus organisatorischen EFM eingeführt. In **Tabelle 1** wurden in der letzten Spalte Anforderungen an bestimmte Reifegrade der vorhergehenden Einordnung der Stationen und des Produktionssystems eingefügt [8, 9]. Die EFM wurden nach VDI 5207 [17] formuliert und um zwei EFM erweitert, die den spezifischen Eigenschaften der CP-MP entsprechen. Diese Maßnahmen sind die Änderung der Ausbringungsmenge sowie die Fertigung eines alternativen Produktes.

Diese EFM basieren auf Grundeigenschaften der CP-MP, der Rekonfigurierbarkeit, Modularität und der umfangreichen internen Vernetzung [8]. Anhand des Kataloges kann auf Grundlage der Datenbewertung auf geeignete EFM zurückgegriffen werden.

### 3.3 Analyse und Charakterisierung der Energieflexibilitätsmaßnahmen

Zur Bewertung der EFM wird zuerst die Energieverschiebung der Maßnahme über den Zeitraum  $T$  bestimmt. Diese lässt sich wie folgt berechnen [9]:

$$\Delta E_{EFM,T} = \Delta P_{EFM,T} \times \Delta t_{ab,T} \quad (1)$$

$\Delta E_{EFM,T}$ : verschobene Energiemenge über den Zeitraum  $T$

**Tabelle 1.** Erweiterter Energieflexibilitätsmaßnahmenkatalog mit bewerteten Maßnahmen [8, 9, 17].

	Maßnahme	Anforderung hohen Reifegrads bezüglich
Organisatorische Maßnahmen	Auftragsunterbrechung	<ul style="list-style-type: none"> <li>Operative Produktionsplanung und -steuerung</li> <li>Re-/Deaktivierung</li> </ul>
	Anpassung der Ressourcenzuordnung	<ul style="list-style-type: none"> <li>Operative Produktionsplanung und -steuerung</li> <li>Gestaltung Station</li> <li>Grundstruktur Station</li> <li>Substituierbarkeit</li> </ul>
	Anpassung der Auftragsreihenfolge	<ul style="list-style-type: none"> <li>Operative Produktionsplanung und -steuerung</li> <li>Steuerung Station</li> </ul>
	Änderung der Kapazitätsplanung	<ul style="list-style-type: none"> <li>Grundstruktur</li> <li>Operative Produktionsplanung und -steuerung</li> <li>Gestaltung Station</li> <li>Substituierbarkeit</li> </ul>
	Verschieben des Produktionsstarts	<ul style="list-style-type: none"> <li>Operative Produktionsplanung und -steuerung</li> </ul>
	Änderung der Bearbeitungsreihenfolge	<ul style="list-style-type: none"> <li>Steuerung Station</li> <li>Operative Produktionsplanung und -steuerung</li> </ul>
	Änderung der Ausbringungsmenge	<ul style="list-style-type: none"> <li>Grundstruktur</li> <li>Operative Produktionsplanung und -steuerung</li> <li>Gestaltung Station</li> <li>Steuerung Station</li> </ul>
	Fertigung eines alternativen Produkts	<ul style="list-style-type: none"> <li>Grundstruktur</li> <li>Operative Produktionsplanung und -steuerung</li> <li>Gestaltung Station</li> <li>Steuerung Station</li> </ul>

**Tabelle 2.** Übersicht des Anwendungsszenarios und der identifizierten Energieflexibilitätsmaßnahme.

	Fertigungsdurchlauf	Untersuchter Bearbeitungsprozess	Organisatorische Energieflexibilitätsmaßnahme	Art der Lastverschiebung
Anwendungsszenario	Entkoppelter Durchlauf	Prozesse Nr. 2 und Nr. 3 im parallelen Dauerbetrieb	Prozessstart verschieben	Lastspitzen reduzieren

$AP_{EFM,T}$ : verschobene Leistung über den Zeitraum  $T$  (Annahme  $AP_{EFM,T}$  konstant)

$\Delta t_{ab,T}$ : Gesamtabruhdauer der EFM über den Zeitraum  $T$

Auf Grundlage der Gesamtausgaben der EFM über den Zeitraum  $T$   $A_{EFM,T}$  und der Einnahmen im Vergleich zum Referenzbetrieb  $U_{EFM,T}$  im Verhältnis zur voraussichtlich zu verschiebenden Energiemenge  $\Delta E_{EFM,T}$  kann der bewertete Gewinn  $g_{EFM,T}$  über den Zeitraum  $T$  bestimmt werden. Dazu werden die Größen durch die verschobene Energiemenge  $\Delta E_{EFM,T}$  dividiert, um die Kennzahlen untereinander vergleichen zu können. Dabei werden die Gesamtkosten im Zusammenhang mit der Durchführung einer EFM beschreiben durch [9]:

$$A_{EFM,T} = A_{inv} + A_{Akt,T} \times n_{EFM,T} + A_{Wart,T} \quad (2)$$

$A_{inv}$ : einmalige, initiale Investitionen

$A_{Akt,T}$ : Bei jeder Aktivierung der EFM anfallende Ausgaben über den Zeitraum  $T$

$n_{EFM,T}$ : Anzahl der Durchführungen der EFM über den Zeitraum  $T$

$A_{Wart,T}$ : Wartungsausgaben zur Aufrechterhaltung der Durchführbarkeit der EFM über den Zeitraum  $T$

Somit wird der bewertete Gewinn  $g_{EFM,T}$  über den Zeitraum  $T$  berechnet [9]:

$$g_{EFM,T} = \frac{U_{EFM,T}}{\Delta E_{EFM,T}} - \frac{A_{inv} + A_{Akt,T} \cdot n_{EFM,T} + A_{Wart,T}}{\Delta E_{EFM,T}} \quad (3)$$

Dabei gilt jene Maßnahme als durchführbar, welche die Bedingung  $g_{EFM,T} > 0$  erfüllt [9].

## 4 Anwendung auf eine Fallstudie

Im Rahmen einer Fallstudie wurde die Methode zur Prüfung der Wirksamkeit angewandt. Es wurden vier allgemeine Bearbeitungsprozesse des Produktionsablaufs untersucht. Dabei handelte es sich um ein bereits existierendes Produktionssystem.

### • Datenaufnahme:

Die Datenaufnahme konnte als abgeschlossen angenommen werden. Die Lastprofile und einige Charakteristika des Produktionssystems dienten als Grundlage.

### • Datenbewertung:

Das Produktionssystem und die Stationen wurden als geeignet für die Durchführung von EFM bewertet. Dabei wurden existierende Daten insofern analysiert, als dass eine Bewertung der Datengrundlage erfolgen konnten. Dabei wurden die Einordnungsverfahren der Methode nicht hinzugezogen. Es konnten Stationen mit hohen Reifegraden und hohen Energieanteilen am Gesamtverbrauch identifiziert werden, da das betrachtete CP-MP hochentwickelt war.

### • Auswahl geeigneter EFM:

Dieser Schritt konnte ausgehend von der Datenbewertung durchgeführt werden. Nach der Auswahl geeigneter Stationen zur Durchführung der EFM wurden die Lastprofile im Zusammenhang mit den ermittelten Reifegraden des Produktionssystems und der Anlagen untersucht. Demnach wurden entsprechende EFM zur Durchführung ausgewählt.

### • Analyse und Charakterisierung der EFM:

Im Rahmen dieses Fallbeispiels konnte die Wirtschaftlichkeitsbewertung als abgeschlossen angenommen werden. Es wurde eine Durchführbarkeit der EFM festgestellt.

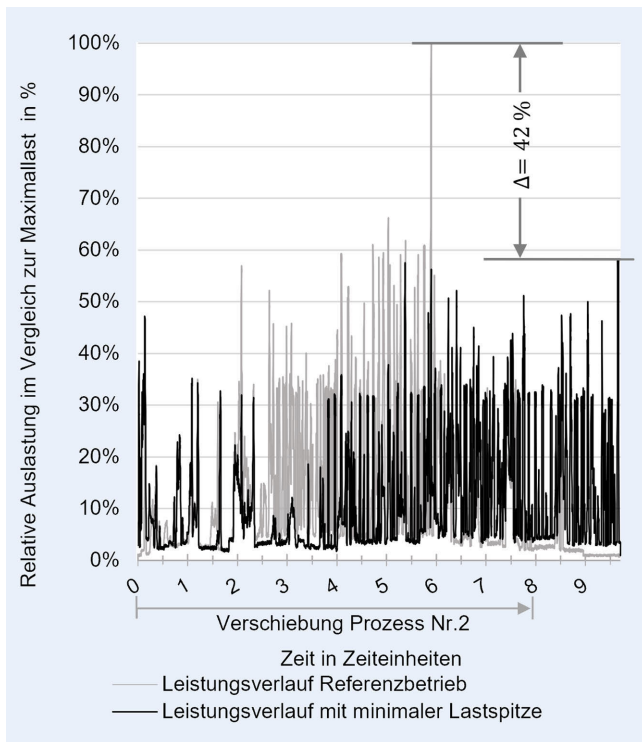
Bei der Anwendung der Methode auf die Fallstudie wurde ein mögliches Anwendungsszenario zur Durchführung von EFM identifiziert. Dabei handelte es sich um eine entkoppelte Betrachtung jeweils zweier Bearbeitungsprozesse (im Folgenden Prozess Nr. 2 und Nr. 3) des Produktionsablaufs, die sich im parallelen Dauerbetrieb befinden. **Tabelle 2** beschreibt das Anwendungsszenario im Zusammenhang der identifizierten EFM.

### 4.1 Identifizierte organisatorische EFM: Verschiebung des Prozessstarts

Die ausgewählten Stationen verfügen über hochentwickelte Steuerungssysteme und erlauben schnelle Zustandswechsel. Das betrachtete CP-MP weist hohe Reifegrade aller Gestaltungsfelder auf. Die ausführenden Stationen betreiben jeweils zwei Prozesse parallel und dauerhaft. Anhand einer Analyse des Lastprofils der beiden Prozesse konnte eine Kumulierung hoher Auslastung in bestimmten Zeiträumen festgestellt werden. Der hohe Reifegrad der Steuerungssysteme der CP-MP ermöglicht dabei eine präzise Verschiebung des Prozessstarts durch welche die Lastspitze in ihrem Betrag reduziert wird. Diese Maßnahme steht mit den festgestellten Eigenschaften der Stationen und des Produktionssystems im Einklang. Dabei wurde aufgrund des parallelen und dauerhaften Betriebs der Stationen angenommen, dass die zeitliche Verschiebung der Prozesse zueinander keine Auswirkungen auf andere Leistungskriterien, wie etwa der Produktivität, hat. Die Lastprofile sowie Eigenschaften der Stationen und des Produktionssystems können aus Gründen der Geheimhaltung nicht veröffentlicht werden.

**Bild 6** zeigt die Lastverläufe der Prozesse vor und nach der Durchführung der Maßnahme. Dabei wurde Prozess Nr. 2 um 8,1 Zeiteinheiten relativ zu Prozess Nr. 3 verschoben.

Es ist festzustellen, dass beim Referenzbetrieb der Stationen eine große Lastspitze auftritt. Der Verlauf der angepassten Last erreicht zum Ende das erste Leistungsplateau mit konstanten, betragsgleichen Ausschlägen. Die Last wurde dabei entzerrt und gleichmäßiger verteilt. Das Anwendungsszenario konnte mit einer Lastspitzenreduktion von etwa 42 % optimiert werden.



**Bild 6.** Lastverlauf des Anwendungsszenarios vor und nach der Verschiebung des Prozessstarts. Grafik: Fraunhofer IPA

## 5 Fazit und Ausblick

Die entwickelte Methode berücksichtigt in ihrem Ablauf umfangreiche Charakteristika der cyber-physischen Matrixproduktionssysteme (CP-MP). Dabei lassen sich die Schritte aufgrund der Einordnungswerkzeuge sowie des EFM-Katalogs anwenden.

In der Fallstudie wurde die entwickelte Methode angewandt. Die Datenbewertung sowie die Analyse und Charakterisierung der EFM konnten in verringertem Umfang durchgeführt werden. Auf Grundlage der vorhandenen Daten erfolgte eine Bewertung und Auswahl der geeigneten EFM. Als Ergebnis der Anwendung wurde die Lastspitze um 42 % im Vergleich zum Referenzbetrieb reduziert. Durch den hohen Reifegrad der Steuerungssysteme der CP-MP wird die Verschiebung von Lastspitzen in sehr detaillierter zeitlicher Auflösung ermöglicht. Somit kann die Infrastruktur des Produktionssystems entsprechend der Maximallastverringern dimensioniert werden, wodurch Einsparungspotenziale an Investitionsaufwendungen genutzt werden können.

Die Methode kann Grundlage für weitere Forschungen im Gebiet der Energieflexibilität in CP-MP sein. Die Genauigkeit der Methode lässt sich weiter verbessern. Dafür können komplexere Kennzahlen eingeführt werden, beispielsweise eine Kostenberechnung der EFM durch die Integration dynamischer Strompreisdaten. Bianchini, Torolsan *et al.* führen in [19] bereits Ansätze hierfür ein.

## Literatur

- [1] Bundesministerium der Justiz (Hrsg.): Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz – EEG) sowie zur Änderung des Energiewirtschaftsgesetzes und des Mineralölsteuergesetzes, vom 29. März 2000. EEG 2000. Bundesgesetzblatt 2000, Teil 1, Nr. 13, S. 305–309
- [2] Bundesministerium der Justiz (Hrsg.): Gesetz zur Einführung von Ausschreibungen für Strom aus erneuerbaren Energien und zu weiteren Änderungen des Rechts der erneuerbaren Energien, vom 13. Oktober 2016. EEG 2017. Bundesgesetzblatt 2016, Teil 1, Nr. 49, S. 2258–2357
- [3] Bachmann, A.; Bank, L.; Bark, C. *et al.*: *Energieflexibel in die Zukunft – Wie Fabriken zum Gelingen der Energiewende beitragen können*. Düsseldorf: VDI-Verlag 2021
- [4] Statista: BDEW. Verteilung des Stromverbrauchs in Deutschland nach Verbrauchergruppen im Jahr 2021 und 2022. Stand: 2023. Internet: [de.statista.com/statistik/daten/studie/236757/umfrage/stromverbrauch-nach-sektoren-in-deutschland/](https://www.statista.com/statistik/daten/studie/236757/umfrage/stromverbrauch-nach-sektoren-in-deutschland/). Zugriff am 10.01.2024
- [5] Vogel-Heuser, B.; Bauernhansl, T.; ten Hompel, M. (Hrsg.): *Handbuch Industrie 4.0. Band 4: Allgemeine Grundlagen*. Heidelberg: Springer 2017
- [6] Foith-Förster, P.; Bauernhansl, T.: Changeable Assembly Systems Through Flexibly Linked Process Modules. *Procedia CIRP* 41 (2016), pp. 230–235
- [7] Beier, J.: *Simulation Approach Towards Energy Flexible Manufacturing Systems*. Cham: Springer International Publishing 2017
- [8] Hellmich, A.; Zumppe, F.; Zumppe, M. *et al.*: *Expertise des Forschungsbeirats der Plattform Industrie 4.0: Umsetzung von cyber-physischen Matrixproduktionssystemen*. München: acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften 2022
- [9] Tristán, A.; Heuberger, F.; Sauer, A.: A Methodology to Systematically Identify and Characterize Energy Flexibility Measures in Industrial Systems. *Energies* 13 (2020) (22), p. 5887
- [10] Grassl, M.; Reinhart, G.: *Energieflexible Fabriken. Maßnahmen zur Steuerung des Energiebedarfs von Fabriken*. Augsburg: Fraunhofer IWU, Projektgruppe Ressourceneffiziente mechatronische Verarbeitungsmaschinen (RMV) 2013
- [11] Abele, E.; Schrems, S.; Schraml, P. *et al.*: Energieeffizienz in der Fertigungsplanung: Frühzeitige Abschätzung des Energieverbrauchs von Produktionsmaschinen in der Mittel- und Großserienfertigung. *wt Werkstattstechnik online* 102 (2012) 1/2, S. 38–22
- [12] Grassl, M.: *Bewertung der Energieflexibilität in der Produktion*. Dissertation, Technische Universität München, 2015
- [13] Popp, R. S.; Zaeh, M. F.: Determination of the Technical Energy Flexibility of Production Systems. *Advanced Materials Research* 1018 (2014), pp. 365–372
- [14] Fraunhofer IPA (Hrsg.): *interaktiv. Matrixproduktion setzt neue Standards*. Internet: <https://interaktiv.ipa.fraunhofer.de/digitale-transformation/matrixproduktion-setzt-neue-standards/>. Zugriff am 10.01.2024
- [15] Kern, W.: *Modulare Produktion. Methodik zur Gestaltung eines modularen Montagesystems für die variantenreiche Serienmontage im Automobilbau*. Wiesbaden: Springer Vieweg 2021
- [16] Greschke, P.: *Matrix-Produktion als Konzept einer taktunabhängigen Fließfertigung*. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 2015
- [17] Verein Deutscher Ingenieure: VDI 5207 Blatt 2: *Energieflexible Fabrik Identifikation und technische Bewertung*. Berlin: Beuth Verlag 2021
- [18] Unterberger, E. F. G.: *Methodik zur Gestaltung energieflexibler Produktionssysteme*. Dissertation, Technische Universität München, 2020
- [19] Bianchini, I.; Torolsan, K.; Sauer, A.: *Flexibility Management for Industrial Energy Systems*. Institut für Elektrizitätswirtschaft und Energieinnovation (IEE), Graz, 17. Symposium Energieinnovation, Graz/Austria, 2022



**Kerim Torolsan, M. Sc.**

*Foto: Fraunhofer IPA*

**Prof. Dr.-Ing. Alexander Sauer**

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA

Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart

[www.ipa.fraunhofer.de](http://www.ipa.fraunhofer.de)

**Manuel Schmalzried, B. Sc.**

Prof. Dr.-Ing. Alexander Sauer

Universität Stuttgart

Institut für Energieeffizienz in der Produktion (EEP)

Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart

[eep.uni-stuttgart.de](http://eep.uni-stuttgart.de)

LIZENZ



Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons  
Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)