

# **Analyse von konventionellen Prioritätsregeln zur Reduktion von CO<sub>2</sub>-Emissionen durch den Einsatz von Photovoltaikanlagen**

## ***Analysis of commonly used priority rules to reduce CO<sub>2</sub> emissions through the use of photovoltaic systems***

Hajo Terbrack, Thorsten Claus, Matthias Götz, TU Dresden, Dresden (Germany),  
hajo.terbrack@mailbox.tu-dresden.de, thorsten.claus@tu-dresden.de,  
matthias.goetz@tu-dresden.de

Frank Herrmann, OTH Regensburg, Regensburg (Germany),  
frank.herrmann@oth-regensburg.de

Maximilian Selmair, BMW Group, Regensburg (Germany),  
maximilian.selmair@bmw.de

**Abstract:** This article discusses job shop scheduling through commonly used priority rules in the context of energy efficiency and emission pollution. While including an onsite photovoltaic system as a volatile energy source, the link between production-related energy consumption and emission pollution is analysed. By simulating production scheduling and onsite energy generation in different weather scenarios, we identify a nonlinear relation between total energy consumption and emissions caused by energy procurement from the grid. This optimization potential is addressed by a combination of two priority rules that considers generation output of the photovoltaic system in production scheduling. Our simulation results show an improvement in total energy consumption, emission pollution and throughput time.

## **1 Einführung**

Die Reduktion von Treibhausgasemissionen spielt weltweit eine immer größere Rolle. So wurde in Deutschland zu Beginn des Jahres 2021 eine CO<sub>2</sub>-Steuer eingeführt, um einen Anreiz zur Emissionsreduzierung zu schaffen. Mittelfristig wird in Deutschland das Ziel verfolgt, die Treibhausgasemissionen bis zu dem Jahr 2030 um 65% in Bezug auf das Jahr 1990 zu senken. Bis 2045 soll in Deutschland Klimaneutralität erreicht werden. Damit orientiert sich die Bundesregierung am Ziel des Pariser Abkommens, dass in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts weltweit Treibhausgasneutralität erreicht werden soll (BEHG 2020; Bundestag 2021).

Einige wissenschaftliche Arbeiten beschäftigen sich bereits damit, CO<sub>2</sub>-Emissionen durch entsprechende Produktionsplanung, etwa auf Ebene des Scheduling, zu verringern. Eine detaillierte Analyse dieser Artikel ist in der Literaturlistenbank zu Nachhaltiger Produktionsplanung von Terbrack et al. (2020) zu finden. Eine Argumentation in diesen Arbeiten ist, dass ein deutlicher Anteil elektrischer Energie durch fossile Brennstoffe erzeugt wird und eine rationelle Nutzung von Energie erhebliche Potentiale zur Reduzierung von energiebezogenen Treibhausgasen bietet (Ding et al. 2016). Im Artikel von Liu et al. (2017) etwa wird ein Job Shop Scheduling-Ansatz vorgestellt, der neben der Minimierung der Zykluszeit auf die Minimierung energiebezogener Emissionen abzielt. Wang et al. (2019) präsentieren ein Optimierungsmodell für ein Ein-Maschinen-Problem zur Minimierung von Emissionen und Zykluszeit. In Guo et al. (2020) werden für ein Fließfertigungsproblem die Zykluszeit, die Maschinenlautstärke sowie die energiebezogenen Emissionen minimiert. Die Minimierung des Stromverbrauchs resultiert dabei in der Regel in einer Verringerung der Emissionen.

Die Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen korreliert aber nicht zwangsweise mit der Reduktion des Energieverbrauchs. So ist ein weiterer Ansatz zur Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen von Produktionsunternehmen die Stromproduktion durch erneuerbare Energiequellen wie Photovoltaikanlagen (PV-Anlagen) (Liu 2016). Durch den Einsatz solcher Anlagen kann bei der Produktion ein gewisser Anteil des gesamten Stromverbrauchs durch emissionsfreien Strom abgedeckt werden. Jedoch hängt die generierte Menge des Solarstroms stark von unterschiedlichen Faktoren wie der Tageszeit, den Sonnenstunden und der Saison ab. Deshalb stehen Unternehmen mit Photovoltaikanlagen täglich unterschiedlich hohe Mengen an Solarstrom zur Verfügung. Aufgrund dieses Zusammenhangs zwischen Zeit und Menge an Solarstromerzeugung gilt es für Unternehmen zu berücksichtigen, dass die Produktion von emissionsfreiem Strom im Tagesverlauf schwanken kann.

Wie bereits in zahlreichen Studien zur Analyse energetischer Einflussfaktoren in Produktion und Logistik Simulationsmodelle zum Einsatz kommen (Wenzel et al. 2017), wird der Zusammenhang zwischen produktionsbezogenem Energieverbrauch und energiespezifischen Emissionen, kombiniert mit emissionsfreier Energieerzeugung, im vorliegenden Artikel simulativ untersucht.

So wird in dieser Arbeit durch eine Simulationsstudie aufgezeigt, dass es Produktionsunternehmen gibt,

- a. bei denen eine Reduktion von CO<sub>2</sub>-Emissionen durch Photovoltaikanlagen signifikant von dem konkreten Belegungsplan der Anlagen abhängt.
- b. bei denen das nach (a) vorhandene Potential durch konventionelle Prioritätsregeln – bedingt durch einen nichtlinearen Zusammenhang zwischen Energieverbrauch und Emissionsausstoß – entweder nicht oder nur zufällig genutzt und teilweise erschlossen wird.
- c. bei denen sich das nach (a) vorhandene Potential durch eine neu aufgestellte Kombination aus Prioritätsregeln in Verbindung mit der Berücksichtigung der Eigenenergieerzeugung besser nutzen lässt als bei einer Belegungsplanung durch konventionelle Prioritätsregeln.

Kapitel 2 stellt im Folgenden das Vorhaben der Simulationsuntersuchungen vor. Kapitel 3 erläutert den Aufbau und die Ergebnisse der Simulationsläufe. In Kapitel 4 werden die Erkenntnisse der Arbeit zusammengefasst sowie ein Ausblick präsentiert.

## 2 Untersuchungsgegenstand

In der Maschinenbelegungsplanung wird bestimmt, zu welchem Zeitpunkt und in welcher Reihenfolge die Produktionsaufträge an den verfügbaren Ressourcen, i.e. Produktionsmaschinen, bearbeitet werden. Dafür werden Optimierungsmodelle oder Heuristiken verwendet. Unter industriellen Rahmenbedingungen werden insbesondere einfache Heuristiken, wie Prioritätsregeln, eingesetzt. Im Kern werden dazu die zur Bearbeitung freigegebenen Aufträge als Operationen in Warteschlangen vor die einzelnen Stationen gereiht. Sobald eine Maschine frei ist, wird aus der entsprechenden Warteschlange der Auftrag mit der höchsten Priorität der Maschine zur Bearbeitung zugeteilt (Claus et al. 2015; Herrmann 2011).

Die Simulationsstudie verwendet als Heuristiken die folgenden sechs, in der Unternehmenspraxis häufig verwendeten Prioritätsregeln.

- FIFO (First-In-First-Out-Regel) und LIFO (Last-In-First-Out-Regel):  
Die Aufträge werden entsprechend der Länge der Wartezeit in absteigender (FIFO) oder aufsteigender (LIFO) Reihenfolge priorisiert.
- KOZ (Kürzeste Operationszeit-Regel) und LOZ (Längste Operationszeit-Regel):  
Die Priorität eines Auftrags bestimmt sich durch die Länge der Operationszeit auf der Maschine. Höchste Priorität erhält der Auftrag mit der kürzesten Operationszeit (KOZ) oder der längsten Operationszeit (LOZ).
- GRB (Größte Restbearbeitungszeit-Regel) und KRB (Kürzeste Restbearbeitungszeit-Regel):  
Abhängig von der Restbearbeitungszeit der noch ausstehenden Operationen wird die Priorität eines Auftrags bestimmt. Nach der GRB-Regel erhält der Auftrag mit der größten Restbearbeitungszeit die höchste Priorität, nach der KRB-Regel der Auftrag mit der kürzesten Restbearbeitungszeit.

Die resultierenden Belegungspläne werden hinsichtlich der Gesamtdurchlaufzeit aller Aufträge, des Gesamtenergieverbrauchs im Shopfloor sowie der energiebezogenen Emissionen bewertet. Weiterhin werden fünf Wetterszenarien betrachtet, in denen sich die Stromerzeugung von PV-Anlagen, bedingt durch variierende Sonneneinstrahlung, unterscheidet.

Ziel dieser Untersuchung ist es, gemäß (a) den Zusammenhang zwischen der Maschinenbelegungsplanung durch konventionelle Prioritätsregeln, dem resultierenden Energieverbrauch und dem Emissionsausstoß unter Berücksichtigung von Eigenenergieerzeugung zu analysieren. Dazu soll – bezogen auf (b) – Verbesserungspotential aufgezeigt werden. Im Anschluss wird, Punkt (c) entsprechend, dargelegt, dass durch eine Kombination aus zwei Prioritätsregeln dieses Potential besser adressiert werden kann als durch konventionelle Prioritätsregeln.

## 3 Simulationsuntersuchung

Mit Hilfe der Simulationssoftware Plant Simulation Version 16 wird in diesem Beitrag die Ressourcenbelegungsplanung in einer Werkstattfertigung simuliert. Zunächst wird untersucht, wie die unterschiedlichen Belegungspläne abhängig von der gewählten Prioritätsregel und dem Wetterszenario Unterschiede im Gesamtenergieverbrauch, in der Nutzung von eigenerzeugter Solarenergie und in den resultierenden Emissionen aufweisen. Im Anschluss wird eine Kombination aus zwei Prioritätsregeln vorgestellt, die in jeder der betrachteten Szenarien zu einem

niedrigeren Energieverbrauch sowie zu niedrigeren energiebezogenen Emissionen führt. Dazu wird simulativ für jedes Wetterszenario ein Schwellenwert bestimmt, mit dem die aufgestellte Kombination aus Prioritätsregeln zu besseren Ergebnissen führt.

### 3.1 Aufbau der Simulationsuntersuchung

Der Simulationsaufbau ist in Abbildung 1 dargestellt. Das modellierte Produktionssystem basiert auf der Arbeit von Selmair et al. (2015) und entspricht einer Werkstattfertigung. Es besteht aus fünf Maschinen mit jeweils einer Warteschlange. Über den Baustein *Energy Analyzer* wird der gesamte produktionsbezogene Stromverbrauch ermittelt, welcher bei den unterschiedlichen Belegungsplänen entsteht. Für die fünf Maschinen werden die Zustände „Arbeitend“, „Rüstend“, „Betriebsbereit“, „Standby“ und „Aus“ mit unterschiedlichen energetischen Leistungswerten zwischen 0 und 7 kW angenommen. Diese Leistungswerte werden in der vorliegenden Arbeit als konstant angenommen und für jede Maschine gilt:  $P_{\text{Arbeitend}} > P_{\text{Rüstend}} > P_{\text{Betriebsbereit}} > P_{\text{Standby}} > P_{\text{Aus}}$ .

Die Zeiten für die Zustandswechsel „Aus → Betriebsbereit“, „Betriebsbereit → Aus“, „Betriebsbereit → Standby“, „Standby → Betriebsbereit“ und „Standby → Aus“ sind für die fünf Maschinen gleich und entsprechen Werten zwischen 2 und 30 Minuten. Dabei gilt:

$$t_{\text{Aus} \rightarrow \text{Betriebsbereit}} > t_{\text{Standby} \rightarrow \text{Betriebsbereit}} > t_{\text{Betriebsbereit} \rightarrow \text{Aus}} > t_{\text{Betriebsbereit} \rightarrow \text{Standby}} = t_{\text{Standby} \rightarrow \text{Aus}}$$

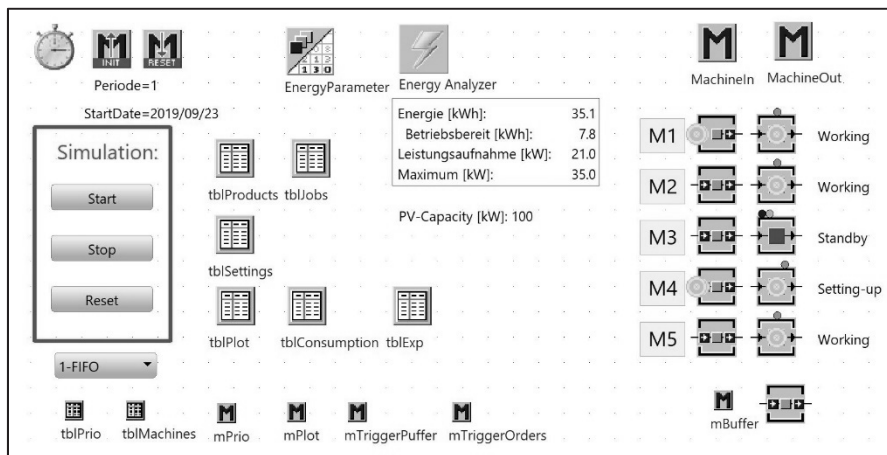
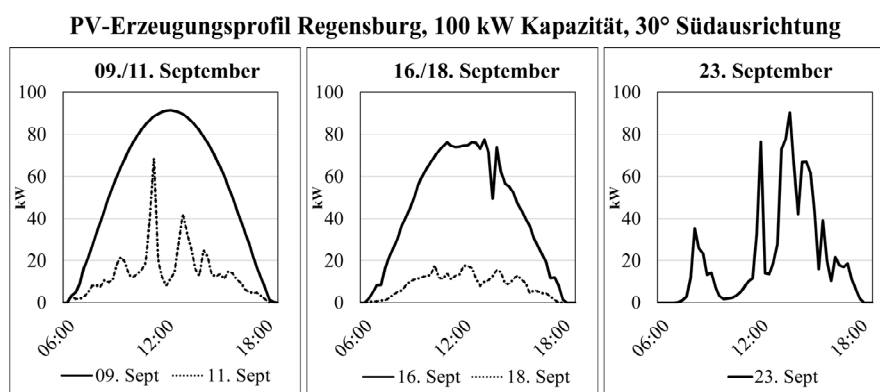


Abbildung 1: Aufbau des Simulationsmodells

In der Fallstudie werden drei Produkte (P1, P2, P3) gefertigt. Diese durchlaufen die Maschinen in unterschiedlicher Reihenfolge, wobei zur Fertigung von P1 und P3 jeweils 7 Operationen, zur Fertigung von P2 8 Bearbeitungsschritte durchgeführt werden. Hierzu werden produktspezifische und maschinenspezifische Rüst- und Bearbeitungszeiten zwischen 5 und 17 Minuten angenommen. Der Auftragsvorrat, dessen Bearbeitung auf den Produktionsmaschinen simuliert wird, besteht aus 9 Produktionsaufträgen mit jeweiligen Mengen zwischen 1 und 4 Stück. Der Auftragsvorrat ist zu Simulationsstart bekannt. Je nach Prioritätsregel werden die

Aufträge unterschiedlich in der Warteschlange vor der jeweiligen Produktionsmaschine angeordnet und in der resultierenden Reihenfolge auf der Maschine abgearbeitet. Sobald eine Produktionsmaschine eine Operation beendet hat und der soeben bearbeitete Auftrag vor die nächste Station gelegt wird, werden die Aufträge in den Warteschlangen erneut, entsprechend der jeweiligen Prioritätsregel, sortiert.

Des Weiteren wird eine Photovoltaikanlage mit Nennleistung 100 kW und 30° Südausrichtung berücksichtigt, die die Produktionsmaschinen mit Solarstrom versorgt. Die Dimensionierung der PV-Anlage basiert auf Expertenbefragungen unseres Praxispartners. Die Höhe der Eigenerzeugung von Solarenergie durch diese Photovoltaikanlage wird in Form von Leistungswerten je 15 Minuten angegeben. Wie Abbildung 2 zeigt, variiert das Erzeugungsprofil hierbei in fünf Wetterszenarien. Die Wetterszenarien entsprechen typischen Septembertagen in Regensburg, Deutschland, und sind der Simulationssoftware für Photovoltaikanlagen PV\*SOL® entnommen.



**Abbildung 2:** Erzeugungsprofile für fünf Septembertage in Regensburg.

Sofern der durch die Produktionsmaschinen ausgehende Energiebedarf nicht durch die PV-Anlage bedient werden kann, wird elektrische Energie aus dem Stromnetz bezogen. Dazu wird angenommen, dass der aus dem Stromnetz zugekaufte Strom Emissionen in Höhe von 401 g CO<sub>2</sub> pro kWh verursacht. Dieser Wert ist nach Icha und Kuhs (2020) eine Hochrechnung der Emissionen des deutschen Energiemixes für das Jahr 2019. An dieser Stelle sei erwähnt, dass, obwohl in der Realität von einem zeitvariablen Emissionsfaktor ausgegangen werden kann, ein weiter Teil der Literatur zu energieorientierter Produktionsplanung einen konstanten Umrechnungsfaktor annimmt (wie beispielsweise Guo et al. 2020, Liu et al. 2017, Wang et al. 2019). Daher wird die Annahme eines konstanten Faktors von 401 gCO<sub>2</sub>/kWh für die Experimente als hinreichend geeignet eingeschätzt.

Für die einzelnen Wetterszenarien wird jeweils die Ressourcenbelegungsplanung nach den sechs genannten Prioritätsregeln simuliert. Arbeitsbeginn ist 06.00 Uhr morgens am entsprechenden Septembertag.

### 3.2 Ergebnisse der konventionellen Prioritätsregeln

Die Ergebnisse der Simulationsläufe mit Ressourcenbelegung durch konventionelle Prioritätsregeln sind in Tabelle 1 aufgeführt. Diese zeigt die Gesamtdurchlaufzeit aller Aufträge (DLZ), den Gesamtenergieverbrauch im Shopfloor ( $EV_{\text{Gesamt}}$ ) und den Energiebezug aus dem Stromnetz ( $EV_{\text{Netz}}$ ) sowie die resultierenden Emissionen (EM) für die durchgeführten Experimente.

**Tabelle 1:** Ergebnisse der Ressourcenbelegung durch konventionelle Prioritätsregeln in fünf Wetterszenarien.

		FIFO	LIFO	KOZ	LOZ	GRB	KRB	Minimum
DLZ	[h]	13.48	12.95	13.02	12.78	12.87	14.15	LOZ 12.78
$EV_{\text{Gesamt}}$	[kWh]	233.50	233.75	229.75	231.00	226.50	240.50	GRB 226.50
09. Sept	$EV_{\text{Netz}}$ [kWh]	20.63	19.75	12.00	14.25	18.13	26.50	KOZ 12.00
	EM [kg]	8.27	7.92	4.81	5.71	7.27	10.63	KOZ 4.81
11. Sept	$EV_{\text{Netz}}$ [kWh]	91.58	87.16	83.33	84.66	84.25	97.10	KOZ 83.33
	EM [kg]	36.72	34.95	33.42	33.95	33.79	38.94	KOZ 33.42
16. Sept	$EV_{\text{Netz}}$ [kWh]	27.31	25.56	17.55	20.05	25.06	32.06	KOZ 17.55
	EM [kg]	10.95	10.25	7.04	8.04	10.05	12.86	KOZ 7.04
18. Sept	$EV_{\text{Netz}}$ [kWh]	128.46	128.71	124.71	125.96	121.46	135.46	GRB 121.46
	EM [kg]	51.51	51.61	50.01	50.51	48.71	54.32	GRB 48.71
23. Sept	$EV_{\text{Netz}}$ [kWh]	82.24	85.77	78.52	80.49	81.07	92.27	KOZ 78.52
	EM [kg]	32.98	34.39	31.49	32.28	32.51	37.00	KOZ 31.49

Die LOZ-Regel erzielt in dieser Fallstudie die geringste Durchlaufzeit von 12.78 h. Die Anordnung nach der LOZ-Regel resultiert dabei nicht im geringsten Energieverbrauch, sondern die Priorisierung nach der GRB-Regel erreicht diesen mit 226.50 kWh. Die Unterschiede im Energieverbrauch lassen sich ableiten durch die Energiebedarfe bei Rüstvorgängen, Hoch- und Herunterfahren von Maschinen und in Standby-Zeiten, deren Anzahl und Länge je nach Prioritätsregel variiert. Wie bereits in Selmair et al. (2015) analysiert, kann aus einem solchen nichtlinearen Zusammenhang zwischen Durchlaufzeit und Energieverbrauch im Shopfloor Optimierungspotential hinsichtlich der Energieeffizienz abgeleitet werden.

Begründet durch die unterschiedliche Sonneneinstrahlung und die damit einhergehende Erzeugungsleistung der Photovoltaikanlage variiert in den unterschiedlichen Wetterszenarien der Bezug elektrischer Energie aus dem Stromnetz sowie die daraus folgenden Emissionen. Auch hierbei zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen den Ressourcenbelegungsplänen der einzelnen Prioritätsregeln, wodurch Aussage (a) bestätigt werden kann. In vier der fünf Wetterszenarien ist die Maschinenbelegung nach der KOZ-Regel diejenige mit dem geringsten Energiebezug aus dem Stromnetz und folglich auch diejenige mit den niedrigsten Emissionen. So werden in vier von fünf Wetterszenarien durch die Ressourcenbelegung nach der KOZ-Regel die Aufträge geeigneter nach der PV-Erzeugung angeordnet, sodass der Energiebezug aus dem Stromnetz und die

Emissionen niedriger sind als bei den anderen Belegungsplänen. Nur in einem der fünf Szenarien, am 18. September, entsprechen die Emissionen bei der energieärmsten GRB-Regel auch dem Minimum unter den konventionellen Prioritätsregeln. Somit erzielt in einem Großteil der Wetterszenarien eine Regel, mit der nicht der niedrigste Gesamtenergieverbrauch erreicht wird, eine Ressourcenbelegungsplanung mit den niedrigsten Emissionen. Daraus kann abgeleitet werden, dass es Szenarien gibt, in denen unter Berücksichtigung von emissionsfreier Energieeigenerzeugung und einem konstanten Emissionsfaktor [CO<sub>2</sub>-Äquivalente g pro kWh Strombezug] zwischen dem Energieverbrauch im Shopfloor und den energiebezogenen Emissionen keine lineare Korrelation besteht. Weiterhin wird in vier von fünf Wetterszenarien selbst bei der emissionsniedrigsten Prioritätsregel nicht die gesamte Solarenergie (Ertrag<sub>PV</sub>) verwendet, wie Tabelle 2 jeweils für den emissionsärmsten Belegungsplan eines jeden Wetterszenarios zeigt. Dazu wird der PV-Reinertrag eines jeden Szenarios zwischen Arbeitsbeginn und Produktionsende mit dem Energieverbrauch verglichen. Basierend auf diesen Ergebnissen kann gefolgert werden, dass Produktionsunternehmen existieren, bei denen die in (b) beschriebenen Kriterien auftreten.

**Tabelle 2:** Energieverbrauch und -quellen der emissionsärmsten Belegungspläne.

	EV <sub>Gesamt</sub> [kWh]	EV <sub>PV</sub> [kWh]	Ertrag <sub>PV</sub> [kWh]	EV <sub>Netz</sub> [kWh]	EM [kg]
09. Sept: KOZ-Regel	229.75	217.75	693.21	12.00	4.81
11. Sept: KOZ-Regel	229.75	146.42	177.93	83.33	33.42
16. Sept: KOZ-Regel	229.75	212.20	556.57	17.55	7.04
18. Sept: GRB-Regel	226.50	105.04	105.04	121.46	48.71
23. Sept: KOZ-Regel	229.75	151.23	283.86	78.52	31.49

Zur Erhöhung des Nutzungsgrads von emissionsfreier Eigenenergieerzeugung und zur Vermeidung von Energieverlusten können Energiespeicher oder Einspeiseoptionen in das Stromnetz genutzt werden. Ein weiterer Lösungsweg besteht in der Ausrichtung der Maschinenbelegungsplanung auf die Erzeugungsleistung. Hierzu wird im Folgenden eine Möglichkeit aufgezeigt.

### 3.3 Kombination aus zwei Prioritätsregeln zur Erhöhung der Eigenenergienutzung und Reduzierung von Emissionen

Die Ergebnisse aus Kapitel 3.2 zeigen, dass die Prioritätsregeln LOZ, GRB und KOZ für die Durchlaufzeit, den gesamten Energieverbrauch sowie die Emissionen die besten Ergebnisse liefern. Dabei wird das Potential der Eigenerzeugung von Solarenergie zur Emissionsreduktion jedoch zumeist nicht vollständig durch diese Prioritätsregeln ausgeschöpft.

Zur Verbesserung der energie- und emissionsbezogenen Kennzahlen sollte die Maschinenbelegungsplanung die Eigenenergieerzeugung berücksichtigen. Dazu werden in weiteren Simulationsläufen für jedes Wetterszenario die Ressourcenbelegungsplanung durch eine Kombination aus LOZ- und KOZ-Regel durchgeführt. Die Wahl der Prioritätsregel basiert auf der als bekannt angenommen mittleren Erzeugungsleistung der PV-Anlage für die nächste Stunde ab dem

Planungszeitpunkt. Ist diese mittlere Erzeugungsleistung größer gleich einem Schwellenwert  $s$ , der relativ zur Nennleistung der PV-Anlage von 100 kW ausgedrückt wird, werden die Aufträge in der Warteschlange nach der LOZ-Regel angeordnet. Bedingt durch konstante energetische Leistung während des Maschinenzustands „Arbeitend“ stellen die Aufträge mit längerer Operationszeit die energieintensiven Aufträge in der Warteschlange dar. Somit werden bei hoher PV-Erzeugung durch die LOZ-Regel die energieintensiven Aufträge priorisiert bearbeitet. Ansonsten, wenn die mittlere Erzeugungsleistung für die nächste Stunde kleiner als der Wert  $s \cdot \text{Nennleistung}$  ist, werden die Aufträge nach der KOZ-Regel priorisiert.

Durch eine Wiederholung der Simulationsläufe, bei denen iterativ der Schwellenwert  $s$  um 0.01 im Intervall  $[0, 1]$  erhöht wird, wird für jedes Wetterszenario ein Schwellenwert ermittelt, bei dem diese Kombination aus LOZ- und KOZ-Regel zu besseren Ergebnissen hinsichtlich Energieverbrauch und Emissionen führt. Die Ergebnisse dieser Simulationsläufe zeigt Tabelle 3.

**Tabelle 3:** Ergebnisse der Simulationsläufe mit einer Kombination aus LOZ- und KOZ-Regel abhängig von Schwellenwert  $s$ .

LOZ-KOZ-s-Regel	Schwellenwert $s$	DLZ [h]	EV <sub>Gesamt</sub> [kWh]	EV <sub>PV</sub> [kWh]	EV <sub>Netz</sub> [kWh]	EM [kg]
09. Sept	0.65	12.42	225.50	220.33	5.17	2.07
11. Sept	0.16	12.20	222.00	149.92	72.08	28.90
16. Sept	0.50	12.42	225.50	214.95	10.55	4.23
18. Sept	0.13	12.73	223.75	105.04	118.71	47.60
23. Sept	0.33	12.73	225.75	153.98	71.77	28.78

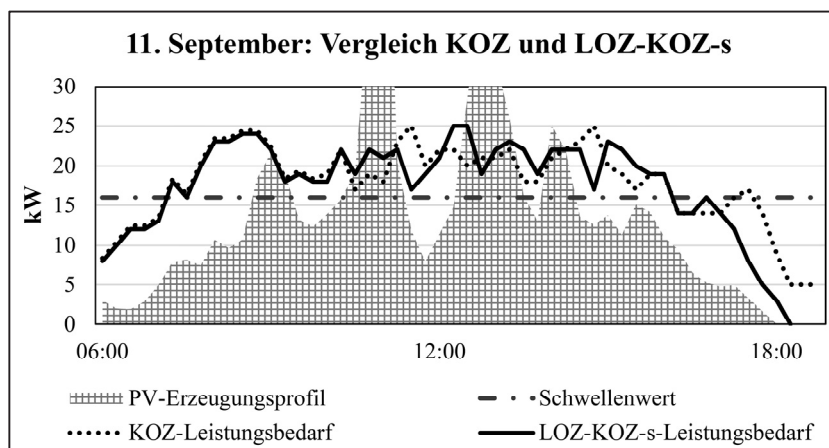
Für die fünf betrachteten Wetterszenarien resultiert diese Kombination aus LOZ- und KOZ-Regel bei geeigneter Wahl des Schwellenwerts  $s$  jeweils in einem Belegungsplan mit niedrigeren Emissionen. Indem die Erzeugungsleistung der Photovoltaikanlage Berücksichtigung findet, erfolgt ein geringerer Energiebezug aus dem Stromnetz in jedem der fünf Wetterszenarien. Damit kann (c) bestätigt werden.

Weiterhin kann in den betrachteten Szenarien durch die Kombination aus LOZ- und KOZ-Regel die Gesamtdurchlaufzeit aller Aufträge sowie der Energieverbrauch im Shopfloor reduziert werden – respektive einem geeigneten Schwellenwert  $s$ . Für diesen ist zu beobachten, dass in den Szenarien mit insgesamt höherer Sonneneinstrahlung der geeignetste Schwellenwert  $s$  auch einen höheren Wert annimmt und somit die Kombination aus LOZ- und KOZ-Regel auch in diesen Szenarien angestrebt wird. So reicht es für die aufgestellte LOZ-KOZ-s-Regel nicht aus, einen Schwellenwert für alle Wetterszenarien zu nutzen. Stattdessen ist die Wahl des Schwellenwerts entscheidend.

Am Beispiel des zweiten Wetterszenarios zeigt Abbildung 3 den Leistungsbedarf des emissionsärmsten Belegungsplan unter den konventionellen Prioritätsregeln (KOZ), den Leistungsbedarf des Belegungsplans nach der entworfenen LOZ-KOZ-s-Regel sowie Ausschnitte des Erzeugungsprofils der PV-Anlage. Der zumeist höhere Leistungsbedarf der Kombination (LOZ-KOZ-s) als der KOZ-Regel in Zeiträumen mit hoher PV-Erzeugung sowie in umgekehrter Weise für Zeiträume mit niedriger



PV-Erzeugung begründet die niedrigeren Emissionen für den Belegungsplan nach LOZ-KOZ-s-Kombination. Dennoch zeigt die Abbildung ebenso das weiterhin verbleibende Optimierungspotential, indem der Leistungsbedarf der Maschinenbelegung noch mehr an das PV-Erzeugungsprofil ausgerichtet werden kann.



**Abbildung 3:** Vergleich der KOZ-Regel mit der aufgestellten Kombination aus LOZ- und KOZ-Regel für den 11. September.

#### 4 Erkenntnisse und Ausblick

In dieser Arbeit wurden Belegungspläne einer Werkstattfertigung nach konventionellen Prioritätsregeln in Verbindung mit Eigenstromerzeugung einer PV-Anlage untersucht und hinsichtlich energiebezogener Emissionen analysiert. Durch einen nichtlinearen Zusammenhang aus Energieverbrauch und Emissionen in vier der fünf Wetterszenarien konnte Optimierungspotential festgestellt werden. Zur Emissionsreduzierung durch die Maschinenbelegungsplanung ist somit nicht ausschließlich der Umfang des Energieverbrauchs entscheidend, sondern auch der Zeitraum des Verbrauchs, da letzterer in Verbindung mit einer volatilen PV-Energieerzeugung die produktionsspezifischen, energiebezogenen Emissionen beeinflussen kann. Eine wie in dieser Arbeit erfolgte Kombination konventioneller Prioritätsregeln zur Ausrichtung auf eine Eigenenergieerzeugung kann bereits bessere Ergebnisse hinsichtlich der Nutzung volatiler Energiequellen erzielen und zu einer Reduktion von energiebezogenen Emissionen führen, ohne notwendigerweise ökonomische Kriterien wie die Gesamtdurchlaufzeit zu verschlechtern.

Zur Validierung der vorgestellten LOZ-KOZ-s-Regel sind Simulationsläufe zu weiteren Szenarien und Fallstudien geplant. Möglicherweise führt diesbezüglich ebenso eine Anpassung des Vorhersagehorizonts zur PV-Erzeugung zu besseren Ergebnissen. Auch soll in weiteren Experimenten die Abbildung von Unsicherheit bezüglich des Wetters bei der Bestimmung eines geeigneten Schwellenwerts berücksichtigt werden. Bezogen auf den in dieser Arbeit angenommen konstanten Umrechnungsfaktor zwischen Emissionen und elektrischer Energie soll in weiteren Simulationsläufen davon abgewichen werden und die Annahme eines zeitvariablen Faktors untersucht werden. Weiterhin könnte die Erhöhung der Flexibilität der

Produktion, etwa durch die Einführung variabler Maschinengeschwindigkeiten oder heterogener paralleler Maschinen mit Unterschieden in den Leistungsbedarfen, das Potential der Eigenenergieerzeugung stärker ausschöpfen. Ein weiterer für zukünftige Forschung geplanter Ansatz besteht in der Modellierung und Lösung eines entsprechenden Optimierungsmodells, das Energieverbrauch, Stromerzeugung und Emissionen simultan betrachtet.

## Literatur

- BEHG (2020): Brennstoffemissionshandelsgesetz vom 12. Dezember 2019 (BGBl. I S. 2728), das durch Artikel 1 des Gesetzes vom 3. November 2020 (BGBl. I S. 2291) geändert worden ist.
- Bundestag (2021): Drucksache des Deutschen Bundestages 19/30230 vom 02.06.2021: Entwurf eines Ersten Gesetzes zur Änderung des Bundes-Klimaschutzgesetzes.
- Claus, T.; Herrmann, F.; Manitz, M.: Produktionsplanung und -steuerung: Forschungsansätze, Methoden und deren Anwendungen. Springer-Verlag, 2015.
- Ding, J.; Song, S.; Wu, C.: Carbon-efficient scheduling of flow shops by multi-objective optimization. *European Journal of Operational Research*, 248 (2016) 3, pp. 758-771.
- Guo, H.; Li, J.; Yang, B.; Mao, X.; Zhou, Q.: Green scheduling optimization of ship plane block flow line considering carbon emission and noise. *Computers & Industrial Engineering*, 148 (2020), pp. 106680.
- Herrmann, F.: Operative Planung in IT-Systemen für die Produktionsplanung und -steuerung: Wirkung, Auswahl und Einstellhinweise von Verfahren und Parametern. Springer-Verlag, 2011.
- Icha, P.; Kuhs, G.: Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 - 2019. Dessau: Umweltbundesamt, 2020.
- Liu, C.: Mathematical programming formulations for single-machine scheduling problems while considering renewable energy uncertainty. *International Journal of Production Research*, 54 (2016) 4, pp. 1122-1133.
- Liu, Q.; Zhan, M.; Chekem, F.; Shao, X.; Ying, B.; Sutherland, J.: A hybrid fruit fly algorithm for solving flexible job-shop scheduling to reduce manufacturing carbon footprint. *Journal of Cleaner Production*, 168 (2017), pp. 668-678.
- Selmair, M.; Herrmann, F.; Claus, T.; Teich, E.: Potentiale in der Reduzierung des Gesamtenergieverbrauchs einer Werkstattfertigung in der Maschinenbelegungsplanung. In: Rabe, M.; Clausen, U. (Eds): *Simulation in Produktion und Logistik 2015*. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2015, S. 177-186.
- Terbrack, H.; Frank, I.; Herrmann, F.; Claus, T.; Trost, M.; Götz, M.: A literature database on ecological sustainability in hierarchical production planning, *Anwendungen und Konzepte der Wirtschaftsinformatik* 12 (2020), pp. 36-40.
- Wang, J.; Yao, S.; Sheng, J.; Yang, H.: Minimizing total carbon emissions in an integrated machine scheduling and vehicle routing problem. *Journal of Cleaner Production*, 229 (2019), pp. 1004-1017.
- Wenzel, S.; Peter, T.; Stoldt, J.; Schlegel, A.; Groß, G.; Pitsch, H.; Rabe, M.; Seewaldt, M.: Betrachtungen energetischer Einflussfaktoren in der Simulation in Produktion und Logistik: Eine Literaturanalyse. In: Wenzel, S.; Peter, T. (Eds): *Simulation in Produktion und Logistik*, kassel university press, Kassel, 2017, S. 9-18.