

Abschlussbericht

zum Promotionsstipendium der Gesellschaft für Energie und Klimaschutz Schleswig-Holstein GmbH (EKSH)

an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel am Lehrstuhl für Supply Chain Management mit dem Thema:

Industrie 4.0 - Selbststeuerungskonzepte zur Optimierung der Energieeffizienz und CO₂-Minderung in der automatisierten Fertigung

Promotionsstipendiat

Sebastian Scholz
Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
Institut für Betriebswirtschaftslehre
Professur für Supply Chain Management
Olshausenstraße 40
24098 Kiel

Betreuer

Prof. Dr. Frank Meisel
Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
Institut für Betriebswirtschaftslehre
Professur für Supply Chain Management
Olshausenstraße 40
24098 Kiel

Zeitraum Stipendium: 01. Juni 2019 – 31. Mai 2022

Kiel, den 14.07.2022

Inhaltsverzeichnis

1. Problemstellung	1
2. Vorgehen und Methodik	2
3. Forschungsergebnisse	3
3.1. Energiebewusstsein in der Produktionsplanung und -steuerung	3
3.2. Energiebewusste Koordination heterogener Produktionsanlagen	5
3.3. Dezentrale Entscheidungsfindung für energiebewusste Intralogistik Ladeentscheidungen	8
4. Ausblick	9
5. Vortrags- und Publikationsverzeichnis	10
6. Literaturverzeichnis	11

1. Problemstellung

Im Jahr 2021 hat Deutschland insgesamt 762 Millionen Tonnen CO₂ emittiert (Statista, 2022). Zudem verzeichnete Deutschland durch Einspeisemanagementmaßnahmen einen Verlust nicht eingespeister erneuerbarer Energie von 6.146 GWh (Bundesnetzagentur, 2020). Hierbei entfällt etwa ein Drittel dieser Ausfallarbeit auf das Bundesland Schleswig-Holstein. Die Karte in Abbildung 1 zeigt auf, dass insbesondere im Nordwesten Schleswig-Holsteins besonders viel Ausfallarbeit durch Einspeisemanagementmaßnahmen resultiert. In anderen Worten bedeutet dies, dass in dieser Region signifikant mehr erneuerbare Energie erzeugt werden könnte, diese allerdings aufgrund mangelnder Stromnetzinfrastruktur nicht eingespeist und abtransportiert werden kann. Unter der Annahme der Verwendung der Ausfallarbeit sowie eines CO₂-Emissionsfaktor von 420 g pro kWh (Umweltbundesamt, 2022) in Anlehnung an den deutschen Strommix aus dem Jahr 2021, ergeben sich potenzielle CO₂-Einsparung für Schleswig-Holstein von rund 870 tausend Tonnen CO₂.

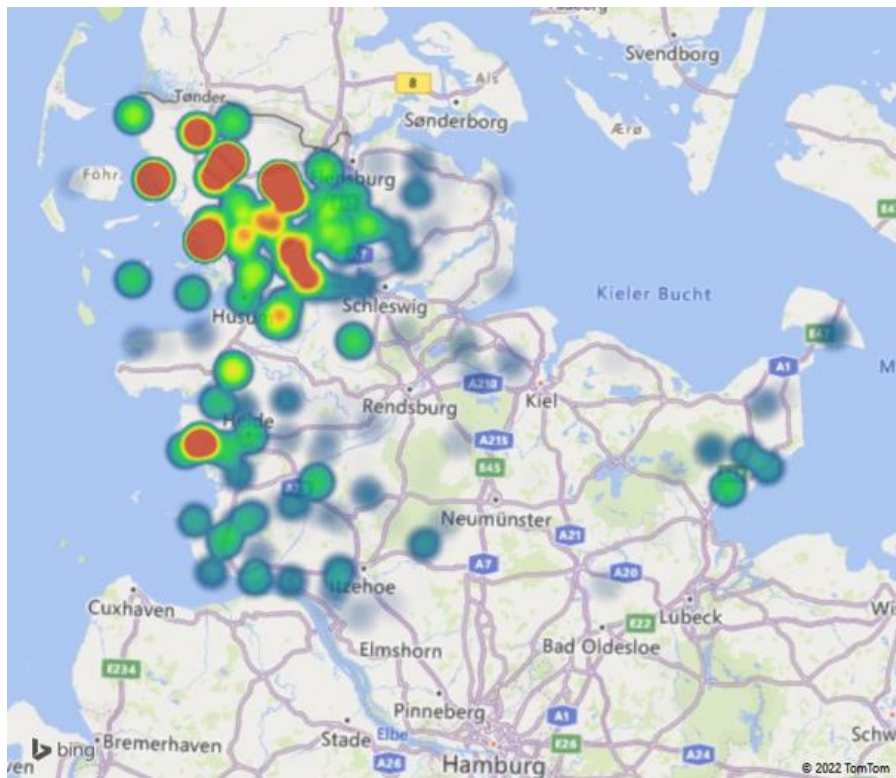


Abbildung 1: Ausfallarbeit in Schleswig-Holstein 2021.

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Schleswig-Holstein Netz AG (2021), Bundesnetzagentur (2021).

Die industrielle Fertigung trägt in erheblichem Maß zu den CO₂-Emissionen bei und elektrischer Strom ist in vielen Bereichen als relevant für den Betrieb von Produktionsanlagen einzuordnen. Eine zunehmende Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen, wie beispielsweise aus Solar- und Windkraftanlagen, ist

ein Ansatz zur Reduktion der CO₂-Emissionen. In diesem Zusammenhang ist die Höhe und Volatilität der erneuerbaren Energieerzeugung eine besondere Herausforderung, da die unzureichende Stromnetzkapazität die Erzeugungsspitzen der erneuerbaren Energie nicht bewältigen kann, was wiederum zu Netzengpässen, Einspeisemanagementmaßnahmen (Redispatch) und Verlusten von erneuerbarer Energieerzeugung führt. In Zeiten von Einspeisemanagementmaßnahmen wird folglich die Erzeugung erneuerbarer Energie begrenzt, da diese aus Gründen der Netzstabilität nicht eingespeist werden kann. Neben kosten- und zeitintensiven Erweiterungen der Stromnetzinfrastruktur besteht ein Ansatz, um Einspeisemanagementmaßnahmen zu reduzieren darin, den lokalen Energieverbrauch in Zeiten von Spitzen in der Energieerzeugung vorübergehend zu erhöhen. Hierdurch steht dem höheren Energieangebot eine entsprechende Nachfrage gegenüber, sodass Netzengpässe weitestgehend vermieden und Einspeisemanagementmaßnahmen reduziert werden können. Dadurch wird eine Möglichkeit geschaffen, das Stromnetz zu entlasten und erneuerbar erzeugte Energie vollumfänglich einzuspeisen.

Im Kontext industrieller Produktion ergibt sich somit die Herausforderung, energieintensive Produktionsprozesse flexibel mit der Verfügbarkeit überschüssiger erneuerbarer Energieerzeugung zu synchronisieren. Den Energieverbrauch in bestimmten Perioden zu forcieren, um das Stromnetz zu entlasten und einen Verlust an erneuerbarer Energie zu vermeiden, stellt gleichzeitig eine Herausforderung für das interne Lastmanagement eines Unternehmens dar, da Spitzenlasten einen substantiellen Bestandteil des Energiepreises ausmachen. Die Prognose von Einspeisemanagementmaßnahmen kann beispielsweise auf der sogenannten Netzampel basieren (Schleswig-Holstein Netz AG, 2022). Diese prognostiziert Einspeisemanagementmaßnahmen auf regionaler Ebene und bietet somit eine landkreisspezifische Vorhersage für überschüssige erneuerbare Energieerzeugung. Für ein lokales Unternehmen bedeutet dies, dass energieintensive Prozesse in diesem Zeitraum durchgeführt werden sollten, sodass die erneuerbar erzeugte Energie verbraucht werden kann und nicht abregelt werden muss. Durch diesen Ansatz kann die Möglichkeit gegeben werden, energieintensive industrielle Herstellungsprozesse mit lokaler erneuerbarer Energieerzeugung zu synchronisieren und einen Beitrag zur industriellen CO₂-Reduktion am Standort Schleswig-Holstein zu leisten.

2. Vorgehen und Methodik

Das Promotionsstipendium wurde zu Beginn der Promotion am Lehrstuhl für Supply Chain Management an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel beantragt. Ziel der Dissertation war die Entwicklung, Implementation und Analyse eines dezentralen Selbststeuerungskonzepts für industrielle Produktionsanlagen unter Verwendung von Modellierungs-, Lösungs- und Simulationstechniken aus dem Bereich des Operations Research. Es galt somit, eine Selbststeuerungsmethodik zur Optimierung der Energieeffizienz und CO₂-

Minderung in der automatisierten Fertigung zu konzeptionieren, mathematisch umzusetzen und nach ihrer Implementierung durch Rechenexperimente zu evaluieren ist. Anschließend galt es, auf dem entwickelten Selbststeuerungskonzept aufzubauen und dieses in eine Simulationsumgebung zu integrieren, um stochastisch-dynamische Effekte der Energieverfügbarkeit und der Produktionsanlagensteuerung abbilden zu können.

3. Forschungsergebnisse

3.1. Energiebewusstsein in der Produktionsplanung und -steuerung

(Bänsch, K.; Busse, J.; Meisel, F.; Rieck, J.; Scholz, S.; Volling, T.; Wichmann, M.G.: Energy-Aware Decision Support Models in Production Environments: A Systematic Literature Review, Computers & Industrial Engineering 159 (2021), 107456, [Link](#).)

Zusätzlich zu dem in Abschnitt 2 skizzierten Vorgehen und dem dort erläuterten Ziel des Promotionsvorhabens konnte im Rahmen einer wissenschaftlichen Kooperation der TU Berlin, der Universität Hildesheim sowie der TU Chemnitz mit der CAU Kiel eine Publikation in Form eines Literaturüberblicks zur energiebewussten Produktionsplanung und -steuerung erarbeitet werden (Bänsch et al., 2021). Dieser Artikel bietet einen guten Einstieg und einen umfassenden Überblick über das Forschungsfeld der energieorientierten Produktionsplanung, sodass zu Beginn die diesbezüglich erarbeiteten Ergebnisse kurz dargestellt werden.

Der beträchtliche Energieverbrauch durch die industrielle Produktion hat in der Vergangenheit zu einer Vielzahl von wissenschaftlichen Publikationen geführt, die Umweltaspekte und ein erhöhtes Energiebewusstsein in das Produktionsmanagement einbeziehen. Heutzutage eröffnen Ansätze, die nachhaltige Energiequellen wie Wind- oder Solarenergie zusammen mit neuen Technologien für die Stromerzeugung und Energiespeicherung vor Ort fördern, eine Vielzahl neuer Möglichkeiten, um den industriellen Energieverbrauch umweltfreundlicher zu gestalten.

Aufbauend auf bereits existierenden wissenschaftlichen Literaturübersichten haben wir die jüngsten Publikationen aus den Jahren 2016 bis 2020 hinsichtlich umweltorientierter mathematischer Entscheidungsunterstützungsmodelle analysiert und systematisiert. Im Detail wurden knapp 200 relevante wissenschaftliche Artikel unter anderem aus den Bereichen Maschinenablaufplanung, Losgrößenplanung und weiteren energieintensiven Produktionsprozessen analysiert. Nachdem der Umfang und die Grenzen des betrachteten Produktionssystems bestimmt wurden, konnte anschließend in den Literatursuchprozess mit ausgewählten Schlagworten in Literaturdatenbanken eingestiegen werden. Die Klassifizierung der Literatur erfolgte anhand eines entwickelten zehndimensionalen Schemas, mit dessen Hilfe Forschungsgebiete identifiziert

wurden, die bereits substanzielle wissenschaftliche Aufmerksamkeit erhalten haben, und Bereiche die bisher weniger Aufmerksamkeit erfahren haben. Des Weiteren haben wir aktiv Themen zukünftiger Forschung adressiert, die in früheren Literaturübersichtsartikeln erwähnt wurden, und konnten zeigen, inwieweit diese Lücken durch neuere Veröffentlichungen geschlossen wurden.

Aus einer ersten quantitativen Auswertung aller identifizierten Artikel lässt sich unmittelbar ableiten, dass die weitaus meisten Publikationen eine klassische Energieversorgung aus dem Stromnetz berücksichtigen, während die Eigenerzeugung vor Ort, beispielsweise durch Windkraftanlagen auf dem Unternehmensgelände, eindeutig unzureichend Berücksichtigung findet. Darüber hinaus wird der Energiepreis als Koordinierungsmechanismen zur Bestimmung des besten Zeitpunkts für Energieverbräuche nur in etwa 60 % der Artikel behandelt. Die Untersuchung kommt zu dem Ergebnis, dass eine Unterscheidung zwischen preis- und ereignisgesteuerter Nachfragesteuerung, beispielsweise einem besonders hohen Windaufkommen, in der Theorie zwar existiert, für die bisher veröffentlichten Entscheidungsunterstützungsmodelle allerdings nicht verwertbar ist, da ereignisgesteuerte Ansätze in der Literatur zum Veröffentlichungszeitpunkt nicht vorkommen. Erwartungsgemäß befasst sich ein Großteil der untersuchten Artikel (ca. 41 %) mit Energiekosten und Energieverbräuchen in der Zielfunktion. Ein weiterer Teil betrachtet Zielfunktionen mit Zeitkomponenten, wie beispielsweise der Minimierung der maximalen Verspätung von Fertigungsaufträgen oder der Minimierung der Fertigstellungszeit. Spitzenleistungs- und Umweltziele fließen weniger als angenommen in die Modelle ein, egal ob mit einem Kosten- oder einem nicht-monetären Bewertungsansatz.

Die quantitative Perspektive wurde durch eine Inhaltsanalyse ergänzt, um aktuelle Entwicklungen und zukünftige Forschungspotentiale aufzeigen zu können. Ebenso ermöglicht die Präsentation von konkreten Fallbeispielen aus der Praxis spezifische Branchen aufzuzeigen, in denen energiebewusste Planung häufig zum Einsatz kommt. Nachfolgend konnten als Ergebnis der durchgeführten Inhaltsanalyse aktuelle Forschungsstränge und zukünftige Forschungspotentiale aufgezeigt werden. Mit einem zunehmenden Bewusstsein für die Möglichkeiten und Potenziale der Energieerzeugung am Produktionsstandort wurden eine Reihe von Artikeln veröffentlicht, um die Herausforderungen der Planung und des Betriebs von dezentralen (erneuerbaren) Energiequellen in verschiedenen Fertigungsumgebungen aufzuzeigen. Zudem haben eine Reihe von Autoren festgestellt, dass die Layout- und Prozessplanung einen großen Einfluss auf den zeitlichen Produktionsablauf sowie deren Energieprofile haben können. Die Fließbandabstimmung von Fertigungsfließlinien (und Demontagelinien) ist ein Thema, das eng mit den Problemen der operativen Produktionsplanung zusammenhängt und aufgrund des großen Einflusses auf den Energieverbrauch von Produktionsprozessen in mehrere wissenschaftliche Arbeiten integriert wurde. Dynamische Bearbeitungsumgebungen sind durch unerwartete, plötzliche Ereignisse (z. B. Ausfälle, Auftragsstornierungen) gekennzeichnet, die den ursprünglich festgelegten deterministischen Zeitplan beeinflussen. Um die Gesamtauswirkung

auf den Zeitplan selbst (d. h. Verzögerungen) zu minimieren, muss eine Umplanung durchgeführt werden. Eine Reihe von Arbeiten befasst sich auch mit der Integration mehrerer Energieformen, bei der die verschiedenen Energieformen wechselseitig ineinander umgewandelt werden können, z. B. von Strom in Wärme. Die Integration mehrerer Energieformen ist entscheidend, um den Gesamtenergiebedarf in industriellen Produktionssystemen zu decken. Außerdem ermöglicht es, Energieeffizienz in einem breiteren Maßstab zu betrachten. Zudem erscheint eine Integration von Transportproblemen mit produktionsbezogenen Planungsentscheidungen aus einer ganzheitlichen Umweltsicht sinnvoll. Die Veröffentlichungen unterscheiden sich durch die Art des Transportprozesses, der in das Produktionsmanagement integriert wird, um weiterreichende Energieeinsparpotenziale zu heben.

Über die aufgezeigten aktuellen und zukünftigen Forschungstendenzen hinaus lässt sich abschließend festhalten, dass ereignisgesteuerte Ansätze, beispielsweise auf Basis besonderer Wetterbedingungen, in der bisherigen Literatur nicht vorkommen und somit eine bedeutende Forschungslücke bilden, die ich in den folgenden Artikeln näher betrachtet habe.

3.2. Energiebewusste Koordination heterogener Produktionsanlagen

(Scholz, S.; Meisel, F.: Coordination of Heterogeneous Production Equipment Under an External Signal for Sustainable Energy, Journal of Cleaner Production 338 (2022), 130461, [Link.](#))

Während Stromnetzbetreiber vor der Herausforderung stehen, die Netzstabilität zu gewährleisten, müssen sich energieintensive Industrieunternehmen um ihr internes Lastmanagement kümmern, um eine Überlastung der unternehmensinternen Energieinfrastruktur und hohe Energiekosten zu vermeiden. Diese beiden Bereiche wurden in einem Forschungsaufsatz zusammengebracht, wobei die Maschinenproduktionsplanung und die Ladeentscheidungen bestandsorientierten Verbraucher so optimiert werden, dass dem internen Lastmanagement eines Unternehmens Rechnung getragen wurde und gleichzeitig die Netzstabilität durch erhöhten lokalen Energieverbrauch in Zeiten von Einspeisemanagementmaßnahmen gewährleistet wird (Scholz und Meisel, 2022). In diesem Zusammenhang erhält das betrachtete Unternehmen eine Prognose über lokale Einspeisemanagementmaßnahmen und somit über die Verfügbarkeit von überschüssiger erneuerbarer Energie. Es wurden zwei Optimierungsmodelle aufgestellt und implementiert, die diese Prognose bei Produktions- und Ladeentscheidungen für heterogene Produktionsanlagen berücksichtigen. Die lexikografisch geordnete Zielfunktionen dieser mathematischen Modelle setzt sich hierbei aus der Minimierung der Gesamtverspätung von Produktionsaufträgen, der Maximierung des Energieverbrauchs in Zeiten übermäßiger erneuerbarer Energieerzeugung und der Minimierung von Spitzenlasten zusammen.

Da es mit Blick auf die verschiedenen Entscheidungsträger eines Unternehmens unrealistisch erscheint, die heterogenen Verbraucher eines komplexen Produktionssystems innerhalb eines einzigen, ganzheitlichen mathematischen Entscheidungsmodells zu berücksichtigen, wurde ein Selbststeuerungskonzept in Form einer Produktionskoordinationsplattform (PKP) zur dezentralen Entscheidungsfindung entwickelt. Die agentenbasierte PKP trifft selbst keine Entscheidungen, sondern ruft den einer Produktionsanlage zugeordneten Software-Agenten mit dem zugehörigen mathematischen Entscheidungsmodell auf, sodass die PKP die Entscheidungsfindung der Agenten und Optimierungsmodelle orchestriert. Auf diese Weise koordiniert sie die Entscheidungen und ist in der Lage eine Vielzahl heterogener Produktionsanlagen abzubilden und untereinander abzustimmen. Die Entscheidungsfindung der Produktionsanlagen erfolgt dann auf dem PKP-Server durch den sogenannte *Smart Agent*, der das jeweilige Optimierungsmodell von Maschinen und bestandsorientierten Verbrauchern beinhaltet. Unter einem Smart Agent wird dabei ein Computerprogramm verstanden, das Regeln und festgelegte Prozesse ausführt, die selbstständig und autonom ausgelöst werden (Wooldridge, 2002). Die PKP verfolgt hierbei stets den Zustand des gesamten Produktionssystems, insbesondere des Lastprofils aus den zuvor getroffenen Produktionsentscheidungen, registriert alle Produktionsanfragen, initiiert die Smart Agents zur Entscheidungsfindung und meldet die getroffenen Produktionsentscheidungen zurück. Auf diese Weise erstellt die Plattform im Zeitverlauf inkrementell einen Arbeitsplan für die Produktions- und Ladeprozesse innerhalb des betrachteten Produktionssystems.

Die Funktionsweise der PKP läuft im Detail wie folgt. Nach dem Empfang eines initiierten Ereignisses ruft die Plattform den entsprechenden Smart Agent auf, um die erforderlichen Entscheidungen zu treffen. Auslöser sind beispielsweise die Freigabe eines neuen Auftrags, der Leerlauf einer Produktionsanlage oder ein zu geringer Bestand eines bestandsorientierten Verbrauchers. Die PKP stellt dem Smart Agent alle benötigten Informationen zur Verfügung (z.B. Auftragsset J für eine Maschine oder Bedarfsraten de_t für ein Hilfsgerät). Mit unserem energieorientierten Fokus liefert die PKP ebenfalls das Lastprofil lp_t , welches den bereits geplanten Energieverbrauch für den Planungshorizont umfasst. Da dieses Profil aus allen zuvor getroffenen Produktionsentscheidungen resultiert, berücksichtigt der aktuell ausgelöste Agent diese Entscheidungen beim Lösen seines eigenen Optimierungsmodells. Abschließend geht ebenfalls die Vorhersage der Einspeisemanagementmaßnahmen kommender Perioden als sogenanntes Ampel-Signal re_t ein. Sobald ein Smart Agent sein individuelles Optimierungsmodell gelöst hat, werden die Entscheidungen, ausgedrückt durch die Entscheidungsvariablen, der jeweiligen Produktionsanlage übermittelt und die Plattform aktualisiert relevante Informationen. Zu den zugehörigen Informationen zählt das Lastprofil des Unternehmens, die Menge bislang unbearbeiteter Fertigungsaufträge, der Energiebedarf der bestandsorientierten Verbraucher sowie deren Batterieladestände.

Darauf aufbauend durchgeführte Rechenexperimente legen ein Fertigungssystem zu Grunde, das aus zwei heterogenen Produktionsanlagentypen mit zwei Maschinen und zwei bestandsorientierten Verbrauchern besteht. Diese Experimente zeigen, dass die Koordinationsplattform im Vergleich zu einem als Benchmark formulierten ganzheitlichen und integrierten Optimierungsmodell gleichwertige Entscheidungen trifft. Es konnte zudem aufgezeigt werden, dass die signalgetriebene Koordinationsplattform eine erhebliche Reduzierung der produktionsbedingten CO₂-Emissionen erreichen kann. Hierzu wurde die Rolle verschiedener Einspeisemanagementszenarien untersucht, um die Auswirkungen unterschiedlicher Häufigkeiten von Einspeisemanagementmaßnahmen und die daraus resultierenden Umweltauswirkungen zu untersuchen. Die monatliche Häufigkeit von Einspeisemanagementmaßnahmen im Bundesland Schleswig-Holstein aus dem Jahr 2019 bildet die Datengrundlage für diese Szenarien.

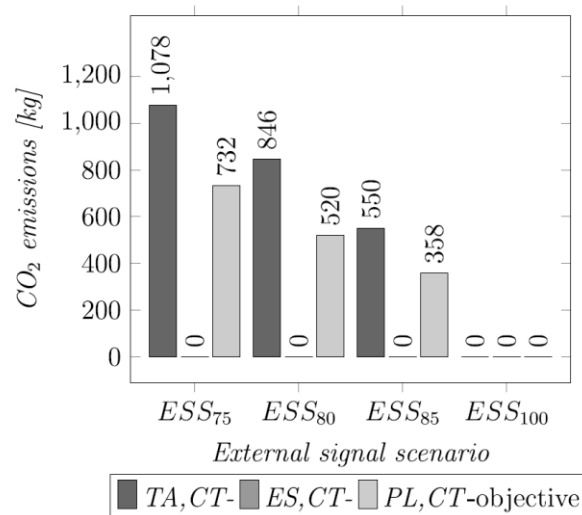


Abbildung 2: CO₂ Emissionen unterschiedlicher Einspeisemanagement Szenarien.
Quelle: Scholz und Meisel (2022).

Aus Abbildung 2 wird ersichtlich, dass ausschließlich die innovative Zielfunktion zur Verlagerung von Produktions- und Ladeprozessen in Perioden mit Einspeisemanagementmaßnahmen (*ES, CT*) die Möglichkeit bietet, den Verlust nachhaltig erzeugter Energie zu minimieren und CO₂-Emissionen signifikant zu senken. Die anderen beiden Zielfunktion zur Minimierung der Gesamtverspätung von Produktionsaufträgen (*TA, CT*) und die Minimierung von Spitzenlasten (*PL, CT*) weisen bedeutend höhere Energieverbräuche in Zeiten ohne Einspeisemanagementmaßnahmen auf und gehen folglich mit höheren CO₂-Emissionen einher. Außerdem konnte mit Sensitivitätsanalysen von entscheidenden Einflussparametern gezeigt werden, wie die Leistung der PKP auf unterschiedliche Grade der Informationsverfügbarkeit reagiert.

3.3. Dezentrale Entscheidungsfindung für energiebewusste Intralogistik Ladeentscheidungen

(Scholz, S.: *Decentral Decision-Making for Energy-Aware Charging of Intralogistics Equipment*, (2022), in *Begutachtung bei Zeitschrift Logistics Research*.)

Neben den Fertigungsmaschinen eines Industrieunternehmens ist dessen Intralogistik, beispielsweise die Materialversorgung der Maschinen mittels elektrischer Gabelstapler, ein weiterer bedeutender Energieverbraucher. Die Betrachtung von stromintensiver Intralogistik wurde in der Forschung zur energiebewussten Produktionsplanung und -steuerung bisher jedoch kaum berücksichtigt. Dem Industrie-4.0 Paradigma folgend, wurde daher die im vorherigen Abschnitt 3.2 eingeführte PKP adaptiert und um statische Ladepolitiken erweitert (Scholz, 2022). Im Allgemeinen können diese Ladepolitiken in Laderythmusverfahren (t , q -Politik, t , S -Politik) und Ladepunktverfahren (s , q -policy, s , S -policy) unterteilt werden. Bei den Laderythmusverfahren erfolgt die Ladung in bestimmten und festen Zeitintervallen t , wobei entweder ein fester Betrag q geladen oder so lange geladen wird, bis das Ladeniveau S erreicht ist. Im Gegensatz dazu wird bei Ladepunktverfahren der Ladevorgang initiiert, wenn der Ladestand unter einen definierten Schwellenwert, den Ladepunkt s fällt. Zu diesem Zeitpunkt wird entweder eine feste Menge q geladen oder die Aufladung erfolgt bis zur Erreichung des Ladeniveau S . Die Funktionsweise der PKP mit den vorgestellten Ladepolitiken wird durch den Pseudocode in Abbildung 3 verdeutlicht.

In einer Simulationsstudie, die auf realen Produktionsdaten eines Unternehmens aus Schleswig-Holstein basiert, konnte die Rolle von Ladeentscheidungen der Intralogistik in Bezug auf den Stromverbrauch eines Unternehmens analysiert werden. In dieser Simulation wurden die vier vorgestellten statischen Ladepolitiken mit einem eigens entwickelten Optimierungsmodell für Ladeentscheidungen bestandsorientierter Verbraucher verglichen. Nach erfolgter Parametrisierung des Zeitintervalls t der Laderythmusverfahren lässt sich grundsätzlich festhalten, dass alle statischen Ladeverfahren Stromverbrauch in Perioden mit Einspeisemanagementmaßnahmen und ohne Einspeisemanagementmaßnahmen aufweisen, da sie strikt dem vorgegebenen Zeitregime folgen. Nur das Optimierungsmodell ist in der Lage, intralogistische Ladeentscheidungen vollständig in die Zeiträume mit Einspeisemanagementmaßnahmen zu verlagern. Es zeigt sich außerdem, dass alle statischen Ladepolitiken im Vergleich zum Optimierungsmodell einen geringeren Gesamtstromverbrauch aufweisen. Folglich antizipiert nur der Optimierungsansatz die überschüssige Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen in Zeiten von Einspeisemanagementmaßnahmen. Dies gibt den Entscheidungsträgern eines Unternehmens die Möglichkeit, den Verlust an überschüssiger erneuerbarer Stromerzeugung zu reduzieren und hierdurch zu einer Reduktion der CO₂-Emissionen beizutragen.

Algorithm 1 Decentral decision making procedure.

```

1:  $E \leftarrow M \cup ILE$   $\triangleright$  set of equipment (production machines and intralogistics equipment)
2:  $U = []$   $\triangleright$  list of unprocessed jobs
3:  $P = []$   $\triangleright$  list of processed jobs
4:  $q \leftarrow$  priority queue()  $\triangleright$  initialize priority queue
5: for  $e \in E$  do
6:    $e.request \leftarrow$  initial request period  $\triangleright$  assign initial request period
7:    $q.put(e)$   $\triangleright$  place request in priority queue
8: while  $q \neq \emptyset$  do  $\triangleright$  priority queue procedure
9:    $e \leftarrow q.get()$   $\triangleright$  select next trigger event from priority queue
10:  smart agent retrieves relevant information  $lp_t, re_t$ 
11:  if  $e$  refers to a production machine then  $\triangleright$  request equipment type 'machine'
12:    compare required capacity with intralogistics equipment inventory
13:    if insufficient intralogistics equipment inventory then
14:       $e.request \leftarrow$  next request period  $\triangleright$  postpone machine request
15:       $ile.request \leftarrow$  next request period  $\triangleright$  define next intralogistics equipment request
16:       $q.put(ile)$   $\triangleright$  insert ile into priority queue
17:    else
18:      call machine scheduling model as black box  $\triangleright$  see Scholz and Meisel [18]
19:       $e.request \leftarrow$  next request period  $\triangleright$  next request when machine runs idle
20:      transmit production decisions to machine
21:      update  $de_t$   $\triangleright$  derive intralogistics equipment demand from production decision
22:      for  $ile \in ILE$  do
23:        if charge policy =  $s, q$  OR if charge policy =  $s, S$  then
24:          if  $ile.inventory \leq s$  then
25:             $ile.request \leftarrow$  next request period  $\triangleright$  define next request
26:             $q.put(ile)$   $\triangleright$  insert intralogistics equipment into priority queue
27:          for  $j \in U$  do
28:            if job  $j$ 's final operation was executed then
29:               $U.remove(j)$   $\triangleright$  remove job from list of unprocessed jobs
30:               $P.append(j)$   $\triangleright$  add job to list of processed jobs
31:  if  $e$  refers to an intralogistics equipment then  $\triangleright$  request equipment type 'intralogistics'
32:  smart agent retrieves relevant information  $de_t$ 
33:  if charge policy =  $t, q$  OR if charge policy =  $s, q$  then
34:    if  $e.inventory + q \leq e.inv_{max}$  then
35:       $e.inventory \leftarrow e.inventory + q$   $\triangleright$  charge with quantity  $q$ 
36:  if charge policy =  $t, S$  OR if charge policy =  $s, S$  then
37:     $\Delta = S - e.inventory$ 
38:     $e.inventory \leftarrow e.inventory + \Delta$   $\triangleright$  charge with quantity  $\Delta$ 
39:  if charge policy =  $t, q$  OR if charge policy =  $t, S$  then
40:     $e.request \leftarrow$  next request period  $\triangleright$  next request in  $t$  periods
41:  if charge policy = optimization model then
42:    solve model (1)-(6)  $\triangleright$  solve intralogistics optimization model
43:     $e.inventory \leftarrow e.inventory + z_{s,t} \cdot c_s$   $\triangleright$  charge with quantity  $z_{s,t} \cdot c_s$ 
44:     $e.request \leftarrow$  next request period  $\triangleright$  next request when intralogistics equipment runs idle
45:  update  $lp_t$ 
46:   $q.put(e)$   $\triangleright$  put next request in priority queue

```

Abbildung 3: Pseudocode PKP Funktionsweise.
Quelle: Scholz (2022).

4. Ausblick

Die Forschungsergebnisse aus Kapitel 3 zeigen auf, dass das entwickelte Selbststeuerungskonzept im Kontext industrieller Fertigung eine Möglichkeit bietet, Einspeisemanagementmaßnahmen und der resultierenden Ausfallarbeit entgegenzuwirken. Hierdurch lässt sich für den Industriestandort Schleswig-Holstein ein maßgebliches Potential zur CO₂-Minderung eröffnen.

Das derzeit in Fertigstellung befindliche vierte Papier bringt die Arbeit des Promotionsvorhabens zu einem thematischen Abschluss. Es baut auf dem entwickelten Selbststeuerungskonzept auf, um dieses in eine Simulationsumgebung zu integrieren und stochastisch-dynamische Effekte der Energieverfügbarkeit und der

Produktionsanlagensteuerung abbilden zu können. Im Gegensatz zum in Abschnitt 3.3 skizzierten Forschungsschwerpunkt auf der Intralogistik eines Unternehmens, liegt der Fokus auf den Produktionsmaschinen und den zugehörigen Fertigungsaufträgen. Die Produktionsumgebung basiert auf einer Werkstattfertigung mit stochastischen Fertigungsauftragseingängen, in der die Aufträge von mehreren Maschinen mit auftragsspezifischen Maschinenreihenfolgen bearbeitet werden müssen. Unter Verwendung realer Produktionsdaten kann das Selbststeuerungskonzept abschließend bewertet werden.

5. Vortrags- und Publikationsverzeichnis

Die Ergebnisse der wissenschaftlichen Untersuchungen wurden auf internationalen Konferenzen und Workshops präsentiert.

1. Scholz, S.; Meisel, F.: Energy aware coordination of heterogeneous production equipment with stochastic job arrivals, *VHB 100 Years Anniversary Conference*, Düsseldorf, presented online, 10.03.2022
2. Scholz, S.; Meisel, F.: Energy aware coordination of heterogeneous production equipment with precedence relations and stochastic job arrivals, *LDIC 2022: International Conference on Dynamics in Logistics*, Bremen, presented online, 25.02.2022
3. Scholz, S.; Meisel, F.: Agent based heterogeneous production equipment coordination in an environmentally oriented production setting, *OR 2021: International Conference on Operations Research*, Bern, presented online, 02.09.2021
4. Scholz, S.: Coordinating heterogeneous production equipment in an event-driven demand response environment, *1. Doktorandenworkshop der Wissenschaftlichen Kommission für Produktionswirtschaft*, Berlin, presented online, 20.03.2021
5. Meisel, F.; Scholz, S.: Self-adapting Production Control System with External Signal for Sustainable Energy, *VHB Annual Meeting*, Frankfurt, presented online, 19.03.2020
6. Scholz, S.; Meisel, F.: Industrie 4.0 - Umweltorientiertes Lastmanagement durch Selbststeuerung, *Workshop Energieorientiertes Produktionsmanagement*, Hildesheim, 28.11.2019
7. Scholz, S.: Industrie 4.0 - Umweltorientiertes Lastmanagement durch Selbststeuerung, *21. Doktorandenworkshop Nord-Ost*, Wittenberg, 09.05.2019

Die im Rahmen der Promotion veröffentlichten, im Begutachtungsprozess befindlichen sowie zeitnah fertigzustellenden wissenschaftlichen Artikel sind im Folgenden aufgeführt:

1. Bänisch, K.; Busse, J.; Meisel, F.; Rieck, J.; Scholz, S.; Volling, T.; Wichmann, M.G.: Energy-Aware Decision Support Models in Production Environments: A Systematic Literature Review, *Computers & Industrial Engineering* 159 (2021), 107456, [Link](#).
2. Meisel, F.; Johnsen, L.; Scholz, S.: Datenbasierte Infrastrukturoptimierung bidirektionaler Wasserstraßen mit Engstellen: Eine Fallstudie für den Nord-Ostsee-Kanal, In: Fritzsche, R., Winter, S., Lohmer, J. (Hrsg.): *Logistik in Wissenschaft und Praxis: Von der Datenanalyse zur Gestaltung komplexer Logistikprozesse*, Springer-Verlag, 2021, 459-477, [Link](#). (Anmerkung: Dieser Aufsatz ist thematisch nicht dem Promotionsvorhaben zuzuordnen sondern entstand aus einem parallel durchgeführten Forschungsvorhaben)
3. Scholz, S.; Meisel, F.: Agent based energy aware coordination of production equipment with precedence relations and stochastic job arrivals, Arbeitspapier in Vorbereitung zur Einreichung.
4. Scholz, S.: Decentral Decision-Making for Energy-Aware Charging of Intralogistics Equipment, (2022), in Begutachtung bei Zeitschrift *Logistics Research*.
5. Scholz, S.; Meisel, F.: Coordination of Heterogeneous Production Equipment Under an External Signal for Sustainable Energy, *Journal of Cleaner Production* 338 (2022), 130461, [Link](#).

Abschließend gilt mein Dank allen Beteiligten der EKSH für die Förderung und das Interesse an meinem Promotionsvorhaben. Das Promotionsstipendium hat es mir ermöglicht mein in den vorangegangenen Abschnitten beschriebenes Forschungsvorhaben in den vergangenen drei Jahren zu realisieren. Ich werde mein Promotionsvorhaben nun als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Supply Chain Management von Prof. Meisel an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel abschließen.

6. Literaturverzeichnis

Bänisch, K.; Busse, J.; Meisel, F.; Rieck, J.; Scholz, S.; Volling, T.; Wichmann, M. G. (2021). Energy-Aware Decision Support Models in Production Environments: A Systematic Literature Review, *Computers & Industrial Engineering*, 159, 107456.

Bundesnetzagentur (2020). Quartalsbericht Netz und Systemsicherheit. Gesamtes Jahr 2020. https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Mediathek/Berichte/2020/Quartalszahlen_Gesamtjahr_2020.pdf?__blob=publicationFile&v=3, abgerufen am 30.05.2022.

Bundesnetzagentur (2021). Marktstammdatenregister (MaStR). <https://www.marktstammdatenregister.de/MaStR/>, abgerufen am 30.05.2022.

Schleswig-Holstein Netz AG (2021). Abgeschlossene Maßnahmen. <https://www.sh-netz.com/de/energie-einspeisen/einspeisemanagement/veroeffentlichungen/abgeschlossene-massnahmen.html>, abgerufen am 30.05.2022.

Schleswig-Holstein Netz AG (2022). Netzampel. <https://www.netzampel.energy/home>, abgerufen am 30.05.2022.

Scholz, S. (2022). Decentral decision-making for energy-aware charging of intralogistics equipment, in Begutachtung.

Scholz, S.; Meisel, F. (2022). Coordination of Heterogeneous Production Equipment Under an External Signal for Sustainable Energy. *Journal of Cleaner Production*, 338, 130461.

Statista (2022). Höhe der CO₂-Emissionen in Deutschland in den Jahren 1990 bis 2020. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/2275/umfrage/hoeheder-co2-emissionen-in-deutschland-seit-1990/#statis-ticContainer>, abgerufen am 30.05.2022.

Umweltbundesamt (2022). CO₂-Emissionen pro Kilowattstunde Strom steigen 2021 wieder an. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/co2-emissionen-pro-kilowattstunde-strom-stei-gen#:~:text=Die%20Erzeugung%20einer%20Kilowatt-stunde%20Strom,2019%20bei%20411%20g%20FkWh.>, abgerufen am 30.05.2022.

Wooldridge, M. (2002). Intelligent agents: The key concepts. In: Vladimír Mařík, Olga Štěpánková, Hana Krautwurmová, Michael Luck, editors, *Multi-Agent Systems and Applications II*, Seiten 3-43, Berlin, Heidelberg, Springer.