

Risikomanagementsystem für die energieorientierte Produktionsplanung und -steuerung

Stefan Roth

Vollständiger Abdruck der von der TUM School of Engineering and Design der
Technischen Universität München zur Erlangung eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)
genehmigten Dissertation.

Vorsitz: Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Daub

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart
2. Prof. Dr. rer. nat. Thomas Hamacher

Die Dissertation wurde am 06.03.2024 bei der Technischen Universität München
eingereicht und durch die TUM School of Engineering and Design am 04.12.2024
angenommen.

Geleitwort der Herausgeber

Die Produktionstechnik ist in Zeiten globaler Herausforderungen, wie der Klimakrise, dem Mobilitätswandel und der Überalterung der Gesellschaft in westlichen Ländern, für eine nachhaltige Weiterentwicklung unserer Industriegesellschaft von zentraler Bedeutung. Der Einfluss eines Industriebetriebs auf die Umwelt und die Gesellschaft hängt dabei entscheidend von den eingesetzten Produktionsmitteln, den angewandten Produktionsverfahren und der eingeführten Produktionsorganisation ab. Erst das optimale Zusammenspiel von Mensch, Organisation und Technik erlaubt es, alle Potenziale für den Unternehmenserfolg auszuschöpfen. Dabei muss größtes Augenmerk darauf gelegt werden, möglichst ressourcenschonend, effizient und resilient zu werden, um flexibel im volatilen Produktionsumfeld zu agieren.

Um in dem Spannungsfeld Nachhaltigkeit, Komplexität, Kosten, Zeit und Qualität bestehen zu können, müssen Produktionsstrukturen ständig neu überdacht und weiterentwickelt werden. Dabei ist es notwendig, die Komplexität von Produkten, Produktionsabläufen und -systemen einerseits zu verringern und andererseits besser zu beherrschen.

Ziel der Forschungsarbeiten des *Instituts für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb)* ist die ständige Verbesserung von Produktentwicklungs- und Planungssystemen, von Herstellverfahren sowie von Produktionsanlagen. Betriebsorganisation, Produktions- und Arbeitsstrukturen sowie Systeme zur Auftragsabwicklung werden unter besonderer Berücksichtigung der Anforderungen des Personals sowie von Nachhaltigkeitsaspekten entwickelt. Die dabei eingesetzten rechnergestützten und Künstliche-Intelligenzbasierten Methoden und die notwendige Steigerung des Automatisierungsgrades dürfen jedoch nicht zu einer Verfestigung arbeitsteiliger Strukturen führen. Fragen der optimalen Einbindung ökologischer und sozialer Aspekte in alle Planungs- und Entwicklungsprozesse spielen deshalb eine sehr wichtige Rolle.

Die im Rahmen dieser Buchreihe erscheinenden Bände stammen thematisch aus den Forschungsbereichen des *iwb*. Diese reichen von der Entwicklung von Produktionssystemen über deren Planung bis hin zu den eingesetzten Technologien in den Bereichen Fertigung und Montage. Die Steuerung und der Betrieb von Produktionssystemen, die Qualitätssicherung, die Verfügbarkeit und die Autonomie sind Querschnittsthemen hierfür. In den *iwb*-Forschungsberichten werden neue Ergebnisse und Erkenntnisse aus der praxisnahen Forschung des Institutes veröffentlicht. Diese Buchreihe soll dazu beitragen, den Wissenstransfer zwischen dem Hochschulbereich und den Anwendenden zu verbessern.

Rüdiger Daub

Gunther Reinhart

Michael Zäh

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit am Fraunhofer-Institut für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik IGCV in Augsburg. Ohne die Unterstützung bei fachlichen und organisatorischen Anliegen, aber auch im familiären Bereich, wäre die Erstellung dieser Arbeit nicht möglich gewesen.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Professor Dr.-Ing. Gunther Reinhart sowie Herrn Professor Dr.-Ing. Rüdiger Daub und Herrn Professor Dr.-Ing. Michael Zäh für die wohlwollende Unterstützung dieser Arbeit und die Möglichkeit zur Promotion. Bei Herrn Professor Dr. Thomas Hamacher bedanke ich mich herzlich für die Übernahme des Korreferats und Durchsicht meiner Arbeit. Herrn Professor Dr.-Ing. Rüdiger Daub danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Weiterer Dank gilt meinen Kolleginnen und Kollegen am Fraunhofer IGCV. Der fachliche Austausch und die engagierte Arbeitsweise in einer sehr angenehmen Atmosphäre machten diese Zeit zu einem besonderen Abschnitt meiner Laufbahn. Dies gilt auch für die Partner und Partnerinnen aus Wissenschaft und Industrie, mit denen ich in einem sehr kollegialen Umfeld in Forschungs- und Industrieprojekten zusammenarbeiten durfte.

Darüber hinaus danke ich allen Studentinnen und Studenten, die mich bei der Ausarbeitung unterstützt haben, insbesondere Lukas Stumpe, Markus Weber, Vincent Kalchschmid und Mirjam Huber.

Besonders hervorheben möchte ich Dr.-Ing. Andrea Hohmann, Dr.-Ing. Martin Rösch und Dr.-Ing. Eric Unterberger für die aufmerksame Durchsicht meiner Arbeit und die wertvollen Hinweise. Weiterhin bedanke ich mich bei Roland Gschwind und Petra Angerer-Gschwind für das gewissenhafte Lektorat.

Schließlich danke ich meinen Freunden, die mich durch ihre interessierten Fragen zum Stand meines Promotionsvorhabens stets motivierten. Bei meinen Eltern Klemens und Ingrid Roth bedanke ich mich ganz herzlich für die Unterstützung in allen Lebenslagen, die mir den Weg von der Schulausbildung über die Ausbildung zum Elektroniker bis hin zu Studium und Promotion ermöglichte. Auch meinen Schwiegereltern Xaver und Traudl Weser möchte ich herzlich für den Rückhalt und die Hilfe rund um Hausumbau und Familie danken, die mir die nötigen Freiräume zur Arbeit an der Dissertation schufen.

Mein größter Dank gilt meiner Frau Christina und unseren beiden Kindern Mateo und Mariella. Ihr habt die kleinen Teilerfolge mit mir gefeiert, mich aber auch in den schwierigen Phasen begleitet, bestärkt und motiviert. Der erfolgreiche Abschluss dieses Promotionsvorhabens in für uns sehr bewegten Zeiten ist für mich sinnbildlich für die Herausforderungen, die wir meistern können. Euch widme ich diese Arbeit.

Kurzfassung

Eine Energieorientierung in der Produktionsplanung und -steuerung ermöglicht produzierenden Unternehmen die Reduktion von Kosten und Treibhausgasemissionen. Sie erhöht jedoch auch die Komplexität beim Umgang mit Störungen im Produktionssystem. Diese Dissertation stellt daher ein Risikomanagementsystem vor, das auf der Modellierung und Priorisierung möglicher Risikobehandlungspfade und der anschließenden Integration ausgewählter präventiver und reaktiver Maßnahmen in den Produktionsplan basiert.

Abstract

Risk management system for energy-oriented production planning and control

An energy-orientation in production planning and control enables manufacturing companies to reduce costs and greenhouse gas emissions. However, it also increases the complexity of dealing with failures in the production system. This dissertation therefore presents a risk management system based on the modeling and prioritization of possible risk treatment paths and the subsequent integration of selected preventive and reactive measures into the production plan.

Hinweis zur geschlechtergerechten Sprache:

Um ein hohes Maß an Lesbarkeit zu erreichen, wird in dieser Arbeit nur die männliche Sprachform verwendet. Sämtliche Personenbezeichnungen gelten jedoch ausdrücklich geschlechtsübergreifend.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	III
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation und Motivation der Arbeit.....	1
1.2 Zielsetzung und Forschungsfragen	4
1.3 Wissenschaftliches Vorgehen und Aufbau der Arbeit.....	5
1.3.1 Wissenschaftstheoretische Einordnung.....	5
1.3.2 Forschungsmethodik.....	6
1.3.3 Aufbau der Arbeit.....	8
2 Grundlagen	10
2.1 Industrielles Energiemanagement.....	10
2.1.1 Energie in Produktionssystemen	10
2.1.2 Strombeschaffungsmodelle und Märkte.....	11
2.1.3 Eigenerzeugung und Speicherung elektrischer Energie.....	13
2.2 Energieorientierte Produktionsplanung und -steuerung (PPS)	14
2.2.1 Ziele und Modelle der PPS.....	14
2.2.2 Energieflexibilität und Energieorientierung in der PPS	17
2.2.3 Risiken im Umfeld der energieorientierten PPS	18
2.3 Risikomanagement in der Produktion.....	20
2.3.1 Grundlagen des Risikomanagements	20
2.3.2 Prozess des Risikomanagements	21
2.3.3 Ansätze des Risikomanagements für produzierende Unternehmen ...	22
2.4 Fazit.....	24
3 Stand der Forschung und Handlungsbedarf	25
3.1 Übergeordnete Ansätze für das Management von Störungen und Risiken in der PPS	25
3.1.1 Ansätze für das Management von Störungen.....	25
3.1.2 Ansätze für das Management von Risiken	26
3.1.3 Fazit	28
3.2 Ansätze zur Beurteilung von Risiken in der Produktion	29
3.2.1 Identifikation und Bewertung von Einzelelementen	29
3.2.2 Berücksichtigung von Wechselwirkungen zwischen Risiken und Maßnahmen	30
3.2.3 Fazit	34
3.3 Ansätze zur Risikobehandlung in der PPS.....	34
3.3.1 Auswahl von Maßnahmen für die PPS.....	34
3.3.2 Integration von Maßnahmen im Rahmen der PPS	36
3.3.3 Fazit	38
3.4 Ableitung des Handlungsbedarfs	39

4	Risikomanagementsystem für die energieorientierte PPS	41
4.1	Definition der Anforderungen an das System	41
4.2	Systemübersicht und Einordnung der Publikationen	44
4.3	Systemdarstellung anhand der einbezogenen Publikationen.....	45
	4.3.1 Element 1: Systemmodell für die energieorientierte PPS (Publikation 1 und Publikation 2).....	46
	4.3.2 Element 2: Modellierung der Risiken und Maßnahmen (Publikation 3)	48
	4.3.3 Element 3: Methode zur Risikobehandlung (Publikation 4).....	49
5	Diskussionsteil mit Anwendung, Bewertung und Reflexion	51
5.1	Anwendung und Bewertung.....	51
	5.1.1 Softwaretechnische Umsetzung.....	51
	5.1.2 Beschreibung des Anwendungsbeispiels Gießerei	52
	5.1.3 Durchführung der Anwendung und Ergebnisse.....	54
	5.1.4 Kosten-Nutzen-Bewertung	57
5.2	Erfüllungsgrad der Anforderungen und Reflexion.....	59
	5.2.1 Erfüllungsgrad der Anforderungen	59
	5.2.2 Reflexion.....	62
6	Zusammenfassung und Ausblick.....	64
6.1	Zusammenfassung	64
6.2	Ausblick.....	64
	Literaturverzeichnis.....	66
	Anhang	82
	A.1 Betreute Studienarbeiten im Themengebiet.....	82
	A.2 Veröffentlichungen des Autors	84
	A.3 Eingegangene Publikationen und Eigenanteile.....	88

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
AHP	Analytic Hierarchy Process
APS	Advanced Planning and Scheduling
äq.	Äquivalente
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
CP	Compromise Programming
CSV	Comma-separated values
DEMATEL	Decision-Making Trial and Evaluation Laboratory
DIHK	Deutscher Industrie- und Handelskammertag
DRM	Design Research Methodology
ERP	Enterprise Resource Planning
FIFO	First in First Out
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis
FRM	Final Reachability Matrix
GUI	Graphical User Interface
HLL	Hault-Laury-Lottery
IRM	Initial Reachability Matrix
ISM	Interpretive Structural Modelling
IT	Informationstechnik
KI	Künstliche Intelligenz
KOZ	Kürzeste Operationszeit
MAUT	Multi Attribute Utility Theory
MCDM	Multi Criteria Decision Making
MES	Manufacturing Execution System
MILP	Mixed-Integer Linear Programming
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
PT	Personentage
reBAP	regelzonenübergreifende einheitliche Bilanzausgleichsenergiepreise
RL	Reinforcement Learning
SSIM	Structural Self Interaction Matrix
SWA	Simple Additive Weighting
TGA	Technische Gebäudeausrüstung
THG	Treibhausgase
TOPSIS	Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution
ZE	Zeiteinheiten

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation und Motivation der Arbeit

Der Verbrauch von Rohstoffen, wie fossile Ressourcen, Erze und Mineralien, nahm weltweit seit den 1950er Jahren kontinuierlich zu und vervielfachte sich mittlerweile. Die abnehmende Verfügbarkeit der natürlichen Ressourcen führt zu einer zunehmenden Belastung für die Wirtschaft und Gesellschaft durch erhöhte Beschaffungs-, Herstellungs- und Distributionskosten, die durch die Zunahme der Weltbevölkerung zusätzlich verschärft wird. Weiten Teilen der globalen Herausforderungen kann nur begegnet werden, wenn das Wirtschaftswachstum vom Ressourcenverbrauch entkoppelt wird. (ABELE & REINHART 2011, NEUGEBAUER 2013) Eine dieser globalen Herausforderungen stellt der vom Mensch verursachte Klimawandel durch den hohen Ausstoß von Treibhausgasen (THG) wie Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄) und Lachgas (N₂O) dar. Die Erkenntnisse zu den daraus hervorgehenden weitreichenden Folgen für das Leben auf der Erde veranlassen Politik, Wirtschaft, Wissenschaft und Gesellschaft zur Entwicklung und Umsetzung von Maßnahmen zur Begrenzung der THG-Emissionen. (BRASSEUR & JACOB 2017)

Mit dem Pariser Klimaabkommen von 2015 verpflichteten sich die teilnehmenden Staaten, Maßnahmen zu ergreifen, um den weltweiten Temperaturanstieg möglichst auf 1,5 °C im Vergleich zum vorindustriellen Zeitalter zu beschränken (UNITED NATIONS 2015). Die Bundesregierung von Deutschland erarbeitete als Reaktion darauf den Klimaschutzplan 2050 mit THG-Reduktionszielen für die Sektoren Industrie, Landwirtschaft, Verkehr, Gebäude und Energiewirtschaft. Diese Reduktionsziele wurden seitdem deutlich verschärft, sodass sich die Bundesrepublik Deutschland das Ziel der Netto-Treibhausgasneutralität bis zum Jahr 2045 setzte. Der Industriesektor soll dazu seine Treibhausgasemissionen von 186 Megatonnen CO₂-Äquivalente (äq.) im Jahr 2020 auf 118 Megatonnen CO₂-äq. im Jahr 2030 reduzieren. Der Energiesektor soll insbesondere durch die Abkehr von fossilen Brennstoffen wie Kohle und Erdgas seine Treibhausgasemissionen im selben Zeitraum von 280 Megatonnen CO₂-äq. auf 108 Megatonnen CO₂-äq. senken. (BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND NUKLEARE SICHERHEIT 2021) Erneuerbare Energieerzeugungsanlagen wie beispielsweise Photovoltaik- und Windkraftanlagen, sollen diese konventionellen Kraftwerke ersetzen und werden stark ausgebaut. Im Jahr 2021 trugen erneuerbare Energieerzeugungsanlagen 18,8 Prozent des Bruttoendenergieverbrauchs in Deutschland bei. Im Jahr 2005 lag ihr Anteil noch bei 7,1 Prozent. Der Anteil erneuerbarer Energien stieg insbesondere bei der Deckung des elektrischen Bruttoenergieverbrauchs von 10,3 Prozent im Jahr 2005 auf 41,0 Prozent im Jahr 2021. (BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND KLIMASCHUTZ 2022) Im Gegensatz zu konventionellen Kraftwerken sind Windkraft- und Photovoltaikanlagen nur begrenzt regelbar und stark witterungsabhängig. Ein hoher Anteil an fluktuierend einspeisenden erneuerbaren Erzeugungsanlagen muss in die bestehenden Energieversorgungssysteme über geeignete Maßnahmen integriert werden, um Netzengpässe, Spannungsschwankungen und Frequenzabweichungen zu vermeiden. (HOLTTINEN 2012)

Mögliche Maßnahmen stellen beispielsweise der Netzausbau und der Aufbau von Energiespeicherkapazität dar. Daneben bietet auch die Anpassung der Verbrauchsseite an die volatile Erzeugung Potenzial und im Vergleich zu Energiespeichern eine investitionsärmere Alternative. Von besonderer Bedeutung ist hierbei die Industrie, da sie einen Anteil von rund 39 Prozent am Primärenergieverbrauch in Deutschland hat (DESTATIS 2021) und eine Vielzahl an Branchen über flexible Prozesse und Anlagen verfügt (SAUER ET AL. 2019). Zahlreiche Studien untersuchten bereits die technisch-organisatorischen Möglichkeiten verschiedener Branchen, darunter beispielsweise die energieintensive Grundstoffindustrie durch AUSFELDER ET AL. (2018), aber auch die der nicht energieintensiven Unternehmen durch SCHULZ ET AL. (2022). Weitere Studien wie beispielsweise BUHL ET AL. (2021) untersuchen die Anreize für die Industrie zur Flexibilisierung der Verbrauchslast und identifizieren u.a. monetäre Anreize durch das Anbieten von Systemdienstleistungen, die Nutzung von eigenerzeugter Energie sowie die Anpassung an schwankende Preise an den Strombörsen. An der Strombörse EPEX Spot haben sich die Preise im Jahr 2022 mit durchschnittlich 235 € pro MWh für die Grundlast gegenüber 2021 mehr als verdoppelt. Jedoch gab es auch zunehmende Preisschwankungen, beispielsweise am Day-Ahead Markt. Die maximale tägliche Preisspreizung betrug über das Jahr 2022 gemittelt 187 € pro MWh bei einer Standardabweichung von 57,3 € pro MWh. (FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR ENERGIEWIRTSCHAFT 2023) Um von diesen Preisschwankungen zu profitieren, müssen die Unternehmen den Lastgang ihrer Anlagen im Produktionssystem an die jeweilige prognostizierte Preissituation in einem bestimmten Zeitraum anpassen. Der Produktionsplanung und -steuerung (PPS) kommt im Zuge dessen eine besondere Bedeutung zu, da sie im Rahmen der Feinplanung die zu bearbeitenden Aufträge einem Zeitintervall und einer Produktionsstation zuordnet und so einen wesentlichen Einfluss auf den Lastgang und elektrischen Energieverbrauch hat (RAGER 2008, S. 5). Werden die logistischen Zielgrößen der PPS, wie hohe Termintreue und kurze Durchlaufzeiten, um Energiekennzahlen erweitert, so wird in der Literatur von einer energieorientierten PPS gesprochen (SCHULTZ 2018, KELLER 2018). Eine Studie aus dem Jahr 2019 mit 95 befragten Unternehmensvertretern kam zu dem Ergebnis, dass bisher etwa jedes siebte Unternehmen Energiedaten in der Produktionsplanung berücksichtigt (LÖDDING ET AL. 2019, S. 21). Die Unternehmen können durch diese Energieorientierung Stromkosten senken und so ihre Wettbewerbsfähigkeit erhöhen, jedoch erhöht sich dadurch auch die ohnehin hohe Komplexität der Aufgaben der PPS zusätzlich. So sind beispielsweise in Zeiten niedriger Strompreise mehr Aufträge einzuplanen als in Zeiten hoher Strompreise. Dies führt zu einer Ballung von Aufträgen in Niedrigpreisphasen, die dann bei der Umsetzung der Aufträge besonders anfällig für Störungen sind, denn die ansonsten ausgewogene Verteilung der Aufträge wurde zugunsten der variablen Strompreise verlagert. Planabweichungen, in erster Linie ausgelöst durch instabile Produktionsprozesse, Fehler von Mitarbeitern und kurzfristige Maschinenausfälle in Form von Störungen, stellen somit ein höheres Risiko dar. (MAYER ET AL. 2016, S. 16) Diese Abweichungen können in der Kategorie der logistischen Auswirkungen u.a. zu Vertragsstrafen für verspätete Liefertermine führen (WIENDAHL 2010). In der Kategorie der energetischen Auswirkungen drohen deutlich höhere Netzentgelte, wenn eine Abweichung des Lastgangs in Form einer Lastspitze zu einer Jahreshöchstlast führt.

Weiterhin fallen in komplex ausgeprägten Energiebeschaffungsmodellen Pönalen für die Abweichung von der ursprünglich beschafften Strommenge an. (MATZEN & TESCH 2017)

Um diesen Herausforderungen zu begegnen, lassen sich die Aufgaben der PPS durch unterschiedliche Softwarelösungen unterstützen, die abhängig vom Planungshorizont ausgewählt werden. Langfristige Aufgaben werden üblicherweise im Enterprise Resource Planning (ERP) System abgebildet. Kurzfristige Aufgaben werden durch Advanced Planning and Scheduling (APS) Systeme und Manufacturing Execution Systeme (MES) unterstützt. Das ERP führt die übergeordnete Datenbasis und erzeugt beispielsweise Materialbedarfe und Planungsparameter, die das APS für die Feinplanung nutzt. Das MES bezieht neben den Plandaten aktuelle Rückmeldedaten des Produktionssystems ein und wird beispielsweise für das Monitoring und die Korrektur von Planabweichungen eingesetzt. (MARCZINSKI 2008) Die Systeme werden häufig mehr als 10 Jahre und teilweise sogar über 20 Jahre lang eingesetzt, da der Aufwand und das Risiko eines Systemwechsels durch die Vielzahl von durch Informationstechnik (IT) unterstützten Abläufen hoch sind (SCHÖNSLEBEN 2020). In der betrieblichen Praxis bestehen bei der Nutzung dieser Systeme jedoch einige Einschränkungen. Nur knapp 30 bis 40 Prozent der in der Studie von 2019 befragten Unternehmen schätzen die Nutzerfreundlichkeit und Funktionalität der eingesetzten Systeme als gut oder sehr gut ein. So räumen die Befragten ein, dass das Verständnis für die eingesetzten Softwaresysteme gering ausgeprägt ist und der Funktionsumfang teilweise nicht vollständig genutzt wird. Weiterhin fehlt zum Teil das Vertrauen in die vorgeschlagenen Maßnahmen bei etwa zwei von drei Unternehmen. (LÖDDING ET AL. 2019, SCHERWITZ ET AL. 2020)

Dieses angespannte Umfeld von hohen Anforderungen durch interne logistische Ziele bei zugleich ausgeprägten Einschränkungen bei der Nutzung der PPS-Systeme gilt es bei weiteren Bemühungen zur Flexibilisierung von Produktionssystemen zu beachten. Die Entscheider der Unternehmen müssen zwischen Kosteneinsparungen durch Energieflexibilität und einem erhöhten Risiko für die Leistung des Produktionssystems durch die zusätzlichen energiepreisbedingten Randbedingungen abwägen. Die Akzeptanz zur Erhöhung der Energieflexibilität von Produktionssystemen mittels einer energieorientierten PPS können monetäre Anreize allein selten fördern. Auch die mit der Energieflexibilität verbundenen Risiken sind auf ein akzeptables Maß zu begrenzen. Dieser Schritt ist aus gesellschaftlicher Sicht unabdingbar, da der Beitrag der Industrie zur Energiewende und damit zum Klimaschutz durch den aufgeführten hohen Anteil am Stromverbrauch sowie hohe Flexibilisierungspotenziale wesentlich ist. Weiterhin gilt es die Wettbewerbsfähigkeit der Industrieunternehmen auch im zukünftigen Energiesystem zu sichern, um ein Abwandern von Unternehmen in Länder, die zu einer höheren Belastung des globalen Klimas führen, zu verhindern.

Zusammengefasst lässt sich festhalten, dass Energieflexibilität für die Unternehmen betriebswirtschaftliche Vorteile durch Kosteneinsparungen bei der Strombeschaffung bewirkt und gesellschaftlich einen wesentlichen Beitrag zur Integration von erneuerbaren Energieanlagen leisten kann. Energieflexibilität unterstützt damit die Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen sowie den Fortschritt der Energiewende und in der Folge davon die Erreichung der Klimaziele. Um die Energieflexibilität in der Industrie umsetzen zu können, muss mit

der zusätzlichen Komplexität und neuen Risiken bei den ohnehin herausfordernden Aufgaben der PPS umgegangen werden. Es ist erforderlich, ein geeignetes Risikomanagementsystem für die spezifischen Anforderungen der energieorientierten PPS zu entwickeln. Da die Systeme der PPS in den Unternehmen weit verbreitet sind und Systemwechsel mit hohem Aufwand und Risiko verbunden sind, ist das Risikomanagementsystem als eigenständiges System mit Schnittstellen zu den bestehenden Systemen auszulegen. Logistische Zielgrößen und die Leistung des Produktionssystems sind für die PPS von zentraler Bedeutung. Daher müssen die logistischen und energetischen Auswirkungen im Rahmen des Risikomanagements integriert betrachtet werden.

1.2 Zielsetzung und Forschungsfragen

Die im vorherigen Abschnitt beschriebene Zunahme der Komplexität der Aufgaben der energieorientierten PPS erschwert im Falle von unerwarteten Ereignissen die Auswahl geeigneter Maßnahmen zur Korrektur des Produktionsablaufs. Es ist erforderlich, mehrere Zielgrößen zu beachten, die teilweise in Konflikt stehen sowie eine Vielzahl möglicher Eingriffe auf ihre Eignung zu prüfen. Im Falle von Fehlentscheidungen drohen hohe Zusatzkosten durch Abweichungen vom ursprünglichen Plan, beispielsweise durch gestiegene Netzentgelte aufgrund von Lastspitzen oder Pönalen für Lieferverzug. Die energieorientierte PPS benötigt daher ein strukturiertes Vorgehen zum Umgang mit Risiken, damit unerwartete Ereignisse in ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit und ihrem Schadensausmaß eingegrenzt werden können. Damit ergibt sich für die vorliegende Arbeit die folgende Zielsetzung:

Entwicklung eines Risikomanagementsystems für die energieorientierte Produktionsplanung und -steuerung

Die energieorientierte PPS und deren bestehende Systeme bieten den geeigneten Rahmen für das Risikomanagementsystem (ROTH & REINHART 2019). Es existieren Vorarbeiten zur Bewertung von Risiken in energieflexiblen Produktionssystemen sowie generelle Ansätze des Risikomanagements in der Produktion, welche eine geeignete Basis an Literatur bilden. Um das Risikomanagementsystem entwickeln zu können, müssen die folgenden drei ingenieurwissenschaftlichen Forschungsfragen beantwortet werden:

1. Mit welchem übergeordneten Ansatz kann ein Risikomanagement nutzerfreundlich und im Rahmen bestehender Systeme der energieorientierten PPS erfolgen?
2. Wie lassen sich Risiken und Maßnahmen im Umfeld der energieorientierten PPS als Einzelelemente und deren komplexe Wechselwirkungen modellieren und bewerten?
3. Wie können die geeigneten Maßnahmen ausgewählt und in den Produktionsplan integriert werden?

1.3 Wissenschaftliches Vorgehen und Aufbau der Arbeit

Dieser Abschnitt verfolgt das Ziel, das wissenschaftliche Vorgehen bei der Erarbeitung der vorgestellten Zielsetzung zu vermitteln. Dazu wird zunächst eine wissenschaftstheoretische Einordnung dieser Arbeit in Abschnitt 1.3.1 vorgenommen. Die angewandte Forschungsmethodik wird in Abschnitt 1.3.2 erläutert. Es folgt die Vorstellung des daraus abgeleiteten Aufbaus der Arbeit in Abschnitt 1.3.3.

1.3.1 Wissenschaftstheoretische Einordnung

Die Wissenschaft lässt sich zunächst in Formalwissenschaften und Realwissenschaften unterteilen. Formalwissenschaften verfolgen die Konstruktion von Sprachen als Zeichensysteme mit Regeln und deren Verwendung, beispielweise im Rahmen der Philosophie, Logik und Mathematik. Die Realwissenschaften hingegen erklären und gestalten wahrnehmbare Wirklichkeitsausschnitte. In den Realwissenschaften werden wiederum Grundlagenwissenschaften und Handlungswissenschaften unterschieden. Während die Naturwissenschaften (Physik, Chemie, Biologie) im Rahmen der Grundlagenwissenschaften theoretische Ziele verfolgen und versuchen Erklärungsmodelle zu bilden, verfolgen die angewandten Handlungswissenschaften mit der Gestaltung sozialer und technischer Systeme praktische Ziele, beispielsweise zur Entscheidungsunterstützung. Im gesellschaftlichen Bereich umfassen die Handlungswissenschaften die angewandten Sozialwissenschaften, worunter im allgemeinen auch die Betriebswirtschaftslehre (BWL) verstanden wird. Die Ingenieurwissenschaften sind dem technischen Bereich der Handlungswissenschaften zugewiesen, dabei bestehen auch Überlagerungen mit den Grundlagenwissenschaften, da zur Ableitung der Handlungsalternativen zunächst die betrachteten Wirklichkeitsausschnitte erklärt werden müssen. (ULRICH & HILL 1976a, S. 305, 1976b)

Die Zielsetzung dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Systems für das Risikomanagement in der energieorientierten PPS und damit die konkrete Lösung einer Problemstellung aus der betrieblichen Praxis der Industrie. Sie ist nach ULRICH & HILL (1976a) den angewandten Handlungswissenschaften zuzuordnen. Damit sind im Rahmen der Arbeiten subjektiv wahrgenommene Wirklichkeitsausschnitte zu explizieren, also präzise und intersubjektiv in Form von Begriffen zu beschreiben, zu generalisieren und Handlungsalternativen zu ihrer Gestaltung zu entwerfen (ULRICH & HILL 1976a, S. 306).

Durch die technisch orientierte Fragestellung im Umfeld der PPS handelt es sich um eine ingenieurwissenschaftliche Arbeit mit dem Schwerpunkt in den Betriebswissenschaften, welche sich mit der Planung und dem Betrieb von Fabriken befasst. Die Einordnung der ingenieurwissenschaftlichen Arbeit innerhalb der Wissenschaft ist in Abbildung 1 dargestellt.

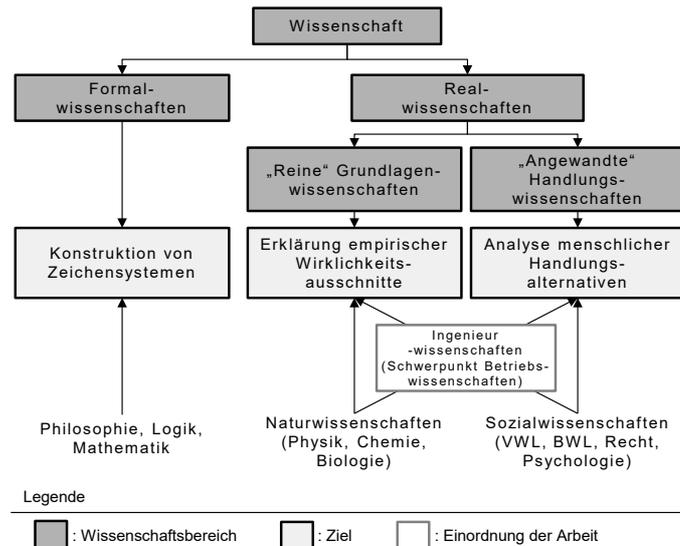


Abbildung 1: Wissenschaftstheoretische Einordnung (angelehnt an ULRICH & HILL 1976a und WEMHÖNER 2005)

1.3.2 Forschungsmethodik

Das Vorgehen zur Beantwortung der Forschungsfragen folgt der von BLESSING & CHAKRABARTI (2009) beschriebenen Design Research Methodology (DRM). DRM wurde als geeignet eingeschätzt, da es eine klare Struktur zur Durchführung der konstruktiv experimentellen Forschungsarbeiten bietet und so die Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse und deren Entstehung ermöglicht. Gleichzeitig bietet DRM ausreichend Freiheitsgrade, um das Vorgehen im Detail an die spezifische Fragestellung anzupassen und geeignete Forschungsansätze für die Phasen zu wählen. DRM verfolgt zunächst die Klärung des Forschungsziels (Research Clarification) mit der konkreten Beschreibung einer Forschungsfrage und der Erörterung der aktuell zugrundeliegenden Ausgangssituation. Die anschließende Phase der beschreibenden Studie I (Descriptive Study I) intensiviert die initiale Recherche zum angestrebten Forschungsziel und vertieft die thematischen Grundlagen mit dem Ziel, Ansatzpunkte zur Verbesserung der Defizite vorhandener Ansätze zu konkretisieren. Hier können auch bereits erste eigene empirische Untersuchungen des Forschungsvorhabens ausgewertet werden und deren Ergebnisse einfließen. Die folgende vorschreibende Studie (Prescriptive Study) bildet den Rahmen für die Arbeiten zur Behebung der identifizierten Defizite. Die Forscher erarbeiten ihren Ansatz zur Verbesserung der konkreten Problemstellung und setzen ihn in Form geeigneter Lösungen um. Mit der abschließenden beschreibenden Studie II (Descriptive Study II) erfolgt die Ermittlung der Auswirkungen und des Nutzens der entwickelten Ansätze, z.B. durch die Anwendung und Analyse eines Szenarios. (BLESSING & CHAKRABARTI 2009)

Die einzelnen Phasen des Vorgehens können nacheinander oder parallel zueinander bearbeitet werden. Weiterhin müssen nicht zwingend alle Phasen durchlaufen werden und die Intensität der Bearbeitung kann variieren. Bei ausreichend vorhandener Literatur ist eine Literaturrecherche (Review-based Study) als Forschungsansatz ausreichend. Eine umfassende

Studie (Comprehensive Study) beinhaltet hingegen neben der Literaturrecherche auch durch die Forscher produzierte Ergebnisse, beispielsweise in Form empirischer Daten. Die initiale Studie (Initial Study) schließt das Vorgehen mit dem Aufzeigen der Auswirkungen der Ergebnisse und bereitet deren Weiterverwendung durch Dritte vor. Die Entscheidungen hierzu sind abhängig von Faktoren wie dem vorgegebenen Zeitrahmen des Forschungsvorhabens oder dem Stand der Erkenntnisse bei Forschungsbeginn. BLESSING & CHAKRABARTI (2009) unterscheiden anhand der Abfolge und Intensität bei der Bearbeitung der Phasen sieben Typen von Forschungsarbeiten. Dabei werden die Typen 5 und 6, die jeweils zwei Phasen mit umfassenden Studien bearbeiten, häufig zu Beginn von Promotionsvorhaben angestrebt. Aufgrund von unterschätztem Bedarf an Zeit und Ressourcen wechseln die Vorgehen meist dann zu Projekten von Typ 2 oder Typ 3 durch die Bearbeitung einer Phase mit einer Literaturrecherche, anstelle einer umfassenden Studie. (BLESSING & CHAKRABARTI 2009, 18 f.)

Der Forschungsprozess umfasst mehrere unterscheidbare Forschungsaktivitäten, welche jeweils drei Aufgabenstellungen zugeordnet werden können. Terminologisch-deskriptive Aufgabenstellungen entwickeln ein Begriffssystem und befassen sich mit deren Anwendung für die Beschreibung von Forschungsobjekten. Empirisch-induktive Aufgabenstellungen befassen sich mit beobachtbaren Zusammenhängen durch empirisch-statistische Untersuchungen sowie der Ableitung und Überprüfung von Hypothesen durch die Generalisierung von Einzelbeobachtungen. Analytisch-deduktive Aufgabenstellungen beinhalten logische Schritte, welche keine zusätzlichen Induktionsschlüsse erfordern und somit insbesondere die Konstruktion von theoretischen Modellen und deren analytische Auswertung enthalten. (ULRICH & HILL 1976b)

Für die vorliegende Arbeit wurde das forschungsmethodische Vorgehen nach BLESSING & CHAKRABARTI (2009) vom Typ 3 gewählt, da dessen empfohlene Forschungsansätze zu den einzelnen Phasen am zutreffendsten der verfügbaren Literatur und den mit den Forschungsfragen verbundenen Aufgaben entsprechen. Dementsprechend sind die ersten beiden Phasen literaturbasiert. Die Klärung der Forschungsziele erfolgt terminologisch-deskriptiv durch Literaturrecherche. Die deskriptive Studie I zur Identifikation der Forschungsdefizite erfolgt ebenfalls literaturbasiert. Dies wird durch ein hohes Maß an geeigneter Literatur im Bereich der generellen Methoden des Risiko- und Störungsmanagements in der Produktion sowie Vorarbeiten zur energieorientierten Produktionsplanung und -steuerung ermöglicht. Die preskriptive Studie ist umfassend und basiert neben der Literaturrecherche und dem Austausch mit Vertretern aus der Industrie auf Simulationsstudien mit realen Auftrags- und Energiedaten. Die inhaltliche Ausarbeitung des Systems erfolgt vorrangig analytisch-deduktiv und schafft neben dem konzeptionellen Vorgehen auch Softwaredemonstratoren und Vorlagen für die Ein- und Ausgabedaten. Die beschreibende Studie II wird mithilfe eines Anwendungsbeispiels aus der Industrie bearbeitet.

Tabelle 1: Forschungsmethoden und Aufgabenstellungen mit Einordnung der Kapitel und Abschnitte dieser Arbeit (Darstellung angelehnt an VERNIM 2020, S. 12)

Phase nach BLESSING & CHAKRABARTI 2009	Forschungsansatz nach BLESSING & CHAKRABARTI 2009	Aufgabenstellung nach ULRICH & HILL 1976b	Kapitel/Abschnitt in dieser Arbeit
Klärung der Forschungsziele	literaturbasiert	terminologisch-deskriptiv	1.1 Ausgangssituation und Motivation 1.2 Zielsetzung und Forschungsfragen 4.1 Anforderungen
beschreibende Studie I	literaturbasiert	terminologisch-deskriptiv	2 Grundlagen 3 Stand der Forschung und Handlungsbedarf
vorschreibende Studie	umfassend	terminologisch-deskriptiv und analytisch-deduktiv	4.2 Systemübersicht 4.3 Systemdarstellung
beschreibende Studie II	initial	empirisch-induktiv	5 Anwendung, Bewertung, Reflexion 6 Schlussfolgerungen

1.3.3 Aufbau der Arbeit

Bei der vorliegenden Arbeit handelt es sich um eine publikationsbasierte Dissertation. Die wesentlichen Inhalte wurden in vier Publikationen veröffentlicht, welche im Rahmen dieser Arbeit zur Beschreibung des entwickelten Systems und dessen Anwendung herangezogen werden. Entsprechend der vorgestellten Zielsetzung sowie dem dargelegten wissenschaftlichen Vorgehen wurde die Arbeit in sechs Kapitel gegliedert, welche in Abbildung 2 dargestellt sind.

In Kapitel 1 wurde zunächst die Ausgangssituation und Motivation der vorliegenden Arbeit dargelegt, woraus die Zielsetzung der Arbeit, die Entwicklung eines Risikomanagementsystems für die energieorientierte PPS, abgeleitet wurde. Im weiteren Verlauf wurde das wissenschaftliche Vorgehen mit wissenschaftstheoretischer Einordnung und der gewählten Forschungsmethodik vorgestellt.

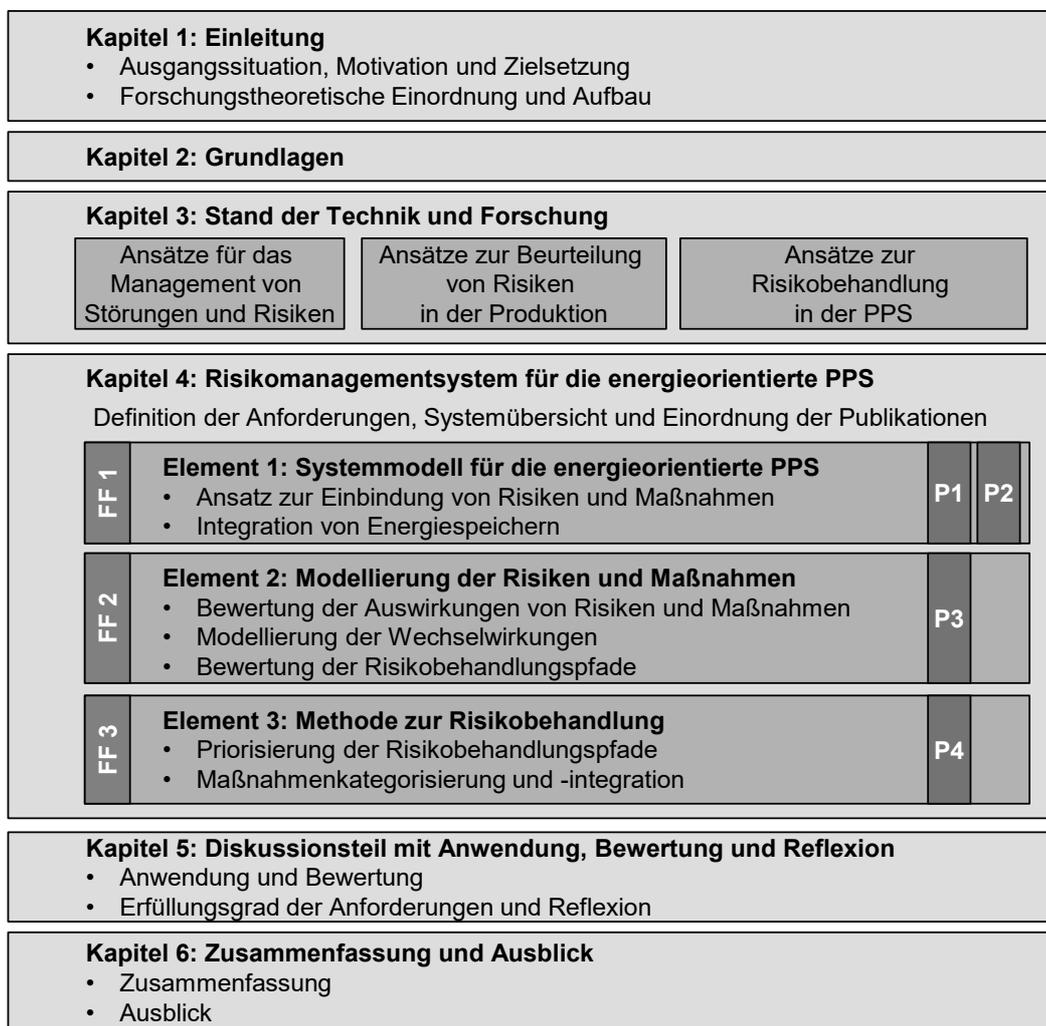
Darauf aufbauend erfolgt in Kapitel 2 die Erläuterung notwendiger Grundlagen, mit dem Ziel ein Verständnis für die relevanten Begrifflichkeiten und Zusammenhänge zu schaffen und eine Eingrenzung des Betrachtungsraums vorzunehmen.

Kapitel 3 widmet sich anschließend der Schilderung des aktuellen Forschungsstands in ausgewählten und für die Erstellung dieser Arbeit relevanten Bereichen. Das Kapitel unterteilt sich in drei Abschnitte zu grundlegenden Ansätzen des Störungs- und Risikomanagements in der PPS sowie spezifischen Ansätzen für die Beurteilung und Behandlung von Risiken im Umfeld der Produktion. Das Kapitel schließt mit der Ableitung des resultierenden Handlungsbedarfs für diese Arbeit.

In Kapitel 4 werden zunächst die vom Handlungsbedarf abgeleiteten Anforderungen an das System aufgeführt und ein Überblick über das entwickelte System mit seinen Elementen und Funktionen gegeben. Strukturiert nach diesen Elementen und Funktionen erfolgt daraufhin die publikationsbasierte Darstellung des Systems.

Kapitel 5 stellt den Diskussionsteil dieser Arbeit dar. Es schildert zunächst die softwaretechnische Umsetzung des Systems und eine Anwendung anhand eines Fallbeispiels aus der Industrie. Es folgt eine Aufwand-Nutzen-Bewertung, die Diskussion des Erfüllungsgrads der Anforderungen sowie eine kritische Reflexion.

Kapitel 6 schließt die Arbeit in Form einer Schlussfolgerung. Diese besteht aus der Zusammenfassung sowie einem Ausblick, welcher unter anderem zukünftige Weiterentwicklungspotenziale und weiterführende Forschungsfragen aufzeigt.



FF: Forschungsfrage P: Publikation

Abbildung 2: Aufbau der Arbeit und Einordnung der Publikationen

2 Grundlagen

2.1 Industrielles Energiemanagement

2.1.1 Energie in Produktionssystemen

Ein Produktionssystem ist ein soziotechnisches System, durch welches Produkte, Kosten und Reststoffe entstehen, indem wertschöpfende Prozesse (z.B. Fertigung und Montage) sowie assoziierte Prozesse (z.B. Transport), eingesetzt werden. Hierzu sind Eingangsgrößen wie Know-how, Methoden, Material, Finanzmittel sowie Energie erforderlich. (NYHUIS ET AL. 2008, S. 20)

Energie ist eine fundamentale physikalische Größe und wird in der Einheit J oder Wh angegeben. Auch wenn es im Sprachgebrauch häufig Verwendung findet, lässt sich Energie thermodynamisch betrachtet weder verbrauchen noch erzeugen. Sie kann lediglich von einer Form in eine andere Form umgewandelt werden. (VDI 4661 2014) Energie tritt in der Natur als Primärenergie beispielsweise in Form fossiler Brennstoffe (z.B. Steinkohle, Braunkohle, Erdöl und Erdgas) sowie regenerativ (z.B. Wasserkraft, Solareinstrahlung und Biomasse) auf. Bis zur Umwandlung in Nutzenergie, beispielsweise in Form von Elektrizität, Wärme, Licht oder kinetischer Energie, wird ausgehend von der Primärenergie eine Energieumwandlungskette über Sekundär- und Endenergie durchlaufen. Sekundärenergie ist der Energieinhalt von Energieträgern (z.B. Koks, Benzin, Strom, Fernwärme) der aus den Primärenergieträgern gewonnen wird. Endenergie ist der Energieinhalt selbiger Energieträger, die dem Nutzer letztendlich zur Verfügung gestellt werden. (MÜLLER ET AL. 2009, 72 ff.)

Mit diesem Verständnis eines Produktionssystems und einer Energieumwandlungskette lassen sich in Abbildung 3 die wertschöpfenden und assoziierten Prozesse vereinfacht darstellen und den Energieflüssen durch ein Produktionssystem zuordnen.

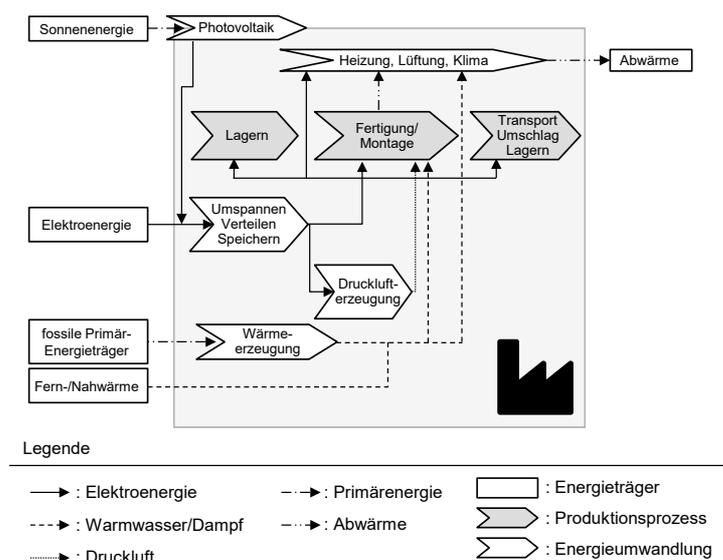


Abbildung 3: Exemplarische Energieflüsse durch eine Fabrik (angelehnt an MÜLLER ET AL. 2009, S. 159 und ergänzt um Photovoltaik und Energiespeicherung)

Der Bedarf an Nutzenergie eines Produktionssystems ist durch mehrere Faktoren beeinflusst, beispielsweise durch die zu fertigenden Produkte und deren Stückzahlen sowie den dazu verwendeten Produktionsanlagen und benötigten Peripherieanlagen (z.B. Hallenlüftung, Heizung und Kühlung). Diese Anlagen benötigen Nutzenergie in Form unterschiedlicher Energiearten, beispielsweise Elektroenergie, Druckluft oder Dampf. Innerhalb von Anlagen finden je nach Bedarf die Wandlungen zwischen den benötigten Energiearten statt, beispielsweise durch die Nutzung von elektrischer Energie zur Erzeugung von Druckluft mittels eines Kompressors. Ausgehend von diesem Bedarf lässt sich ermitteln, welche Endenergien an Märkten zu beschaffen sind und welche Primärenergien am Standort für Energieeigenerzeugung genutzt werden können. (MÜLLER ET AL. 2009)

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der elektrischen Energie, da deren Beschaffung wesentlich durch Energieflexibilität im Rahmen der PPS beeinflusst werden kann (KELLER 2018) und da u.a. schwankende Preise an den Strommärkten einen monetären Anreiz für den energieflexiblen Betrieb von Produktionssystemen darstellen. Weitere Energiearten wie beispielsweise thermische Energie werden anhand von Kopplungen durch Anlagen oder Wechselwirkungen untereinander berücksichtigt.

Dass die Beschaffung und Nutzung von Energie in Betrieben unter der Berücksichtigung ökologischer und ökonomischer Zielsetzungen erfolgt, soll ein betriebliches Energiemanagement sicherstellen (VDI 4602-1). Das Energiemanagement ist daher im Rahmen des operativen Betriebs u.a. mit den Aufgaben der Entwicklung und Berechnung von Energiekennzahlen oder der Erstellung von Energieberichten betraut. Daneben liegen die Planung des Energiebedarfs und die Durchführung der Prozesse zu dessen Deckung durch den Energieeinkauf an den Strommärkten oder durch Energieeigenversorgung im Aufgabengebiet des Energiemanagements. (POSCH 2011, S. 155). Das Energiemanagement arbeitet in der betrieblichen Praxis häufig separiert von der Produktionsplanung. Um Potenziale der Energieflexibilität ganzheitlich auszuschöpfen und zuverlässig umzusetzen, sollte das Energiemanagement über definierte Schnittstellen im Austausch mit der PPS arbeiten. (VDI 5207-1 2020)

2.1.2 Strombeschaffungsmodelle und Märkte

Unternehmen stehen verschiedene Strombeschaffungsmodelle zur Verfügung, die zumeist im Austausch mit Stromanbietern realisiert werden. Die Auswahl eines geeigneten Modells erfolgt unter der Berücksichtigung der Entwicklungen und Mechanismen komplexer Energiemärkte. Daher sind im Entscheidungsprozess verschiedene Vor- und Nachteile sowie Chancen und Risiken der angebotenen Modelle abzuwägen. (SCHUMACHER & WÜRFEL 2015, S. 61) Kleinere und mittelständische Kunden greifen für den Strombezug zumeist auf einen Vollversorgungsvertrag mit dem Stromlieferanten zurück. Diese erfordern lediglich eine grobe Bedarfsprognose zur erwarteten Höchstlast und dem voraussichtlichen Jahresverbrauch. Der Preis für das Unternehmen ist mittels eines Grundpreises und eines Arbeitspreises für eine Kilowattstunde gelieferter elektrischer Energie vertraglich mit dem Lieferanten vereinbart. Dieser gewährleistet die Preise für den Kunden und trägt die weiteren Chancen und Risiken der Beschaffung am Markt. (KONSTANTIN 2017, 456 f.)

Verfügen die Unternehmen u.a. über energiewirtschaftliches Know-how, spezialisierte Einkäufer und über eine organisatorische Struktur zur Prognose von Bedarfen, bieten sich den Unternehmen strukturierte Beschaffungsmodelle, deren ausgeprägteste Form das Portfoliomanagement darstellt. Beim Portfoliomanagement wird der Lastgang des Unternehmens in einzelne Standardprodukte aufgeteilt, die an Großhandelsmärkten gehandelt werden können. (SCHUMACHER & WÜRFEL 2015, 88 f.) So können langfristige Verträge für die Lieferung von Grundlast ausgeschrieben werden, die z.B. für ein oder mehrere Jahre den Teil der Energie abdecken, der zu jeder Tageszeit und auch an Wochenenden und Feiertagen erforderlich ist. Langfristige Verträge für die Mittellast sehen häufig die Stromlieferungen für die Werk-tage vor und ergänzen die Grundlast. Der verbleibende Rest des Strombedarfs wird über den Spotmarkt der Börse täglich eingekauft. (KONSTANTIN 2017, S. 455) Der Spotmarkt bildet neben dem Terminmarkt für langfristige Lieferverträge eines der Marktsegmente des Großhandelsmarkts. Am Spotmarkt können kurzfristige Geschäfte für die Lieferung von Strom am Folgetag getätigt werden. (SCHUMACHER & WÜRFEL 2015, S. 91) Am sogenannten Day-Ahead Markt können an der europäischen Strombörse EPEX SPOT täglich und ganzjährig Kauf- und Verkaufsgebote bis 12:00 Uhr für den folgenden Handelstag abgegeben werden. Die Auktionsergebnisse werden in Form von 24 Stundenpreisen täglich ab 12:40 Uhr bekannt gegeben. Die Intraday-Auktion beginnt täglich um 15:00 Uhr und ermöglicht den Kauf oder Verkauf von elektrischer Energie über 15-Minuten-Auktionen. So ist eine sehr kurzfristige und gezielte Anpassung an Veränderungen der Erzeugung und des Verbrauchs der Unternehmen möglich. (BAUMHÖGGER & PERRET 2017, S. 91) Die gekaufte elektrische Energie ist innerhalb bestimmter Toleranzen zum jeweiligen Zeitpunkt abzunehmen. Abweichungen davon können dem Abnehmer in Form einer Pönale in Rechnung gestellt werden. Diese orientieren sich an den sogenannten Ausgleichsenergiekosten, die im System zum Ausgleich der Abweichung angefallen sind. (HANFELD 2021, S. 307) Diese Arbeit fokussiert die kurzfristigen Liefergeschäfte an den Spotmärkten, da deren Preisprognosen in die energieorientierten Planung als Zielgröße einfließen und Abweichungen im Rahmen der Produktionssteuerung zu vermeiden sind.

Neben den Kosten für die Lieferung der elektrischen Energie bilden die Netznutzungsentgelte einen weiteren wichtigen Kostenbestandteil der Energiebeschaffung. Die Netznutzungsentgelte werden vom Netzbetreiber erhoben und dem Unternehmen als Netznutzer über den Rahmenvertrag mit dem Stromlieferanten in Rechnung gestellt. Daneben besteht für die Unternehmen die Möglichkeit einen direkten Vertrag mit dem örtlichen Netzbetreiber abzuschließen. (KONSTANTIN 2017, S. 450) Die Netznutzungsentgelte setzen sich gewöhnlich aus drei Komponenten zusammen. Neben einem jährlichen Grundpreis wird ein Arbeitspreis in Cent pro Kilowattstunde sowie ein Leistungspreis in Euro je Kilowatt festgelegt. Der Arbeitspreis ist damit eine verbrauchsabhängige Komponente. Der Leistungspreis richtet sich nach der höchsten Last in einer Abrechnungsperiode, welche z.B. einem Kalenderjahr entsprechen kann. (SCHUMACHER & WÜRFEL 2015, S. 59) Eine Erhöhung dieser sogenannten Jahreshöchstlast, beispielsweise durch ein ungeplantes Zuschalten einer großen Produktionsanlage, wirkt sich auf den Leistungspreisbestandteil für jede Kilowattstunde im gesamten Abrechnungszeitraum aus.

2.1.3 Eigenerzeugung und Speicherung elektrischer Energie

Zur Erzeugung von elektrischer Energie werden vorrangig kohle- und erdgasbefeuerte Kraftwerke, Kernkraftwerke sowie regenerative Energieerzeugungsanlagen eingesetzt. Letztere beinhalten u.a. Windenergieanlagen und Photovoltaikanlagen, welche durch eine von der Witterung abhängige, fluktuierende Einspeisung geprägt sind. (HEUCK 2013, 6 ff.) Nach einer Studie des Deutschen Industrie- und Handelskammertag (DIHK) erzeugten im Jahr 2021 bereits 33 Prozent der Unternehmen elektrische Energie aus erneuerbaren Quellen am Standort selbst oder realisierten Projekte zum Ausbau der regenerativen Eigenerzeugung. (DEUTSCHER INDUSTRIE- UND HANDELSKAMMERTAG E. V. 2021). Für die betriebliche Eigenversorgung eignen sich insbesondere Photovoltaikanlagen, die sich in ihrer Wettbewerbsfähigkeit in den letzten Jahren stark verbesserten und nunmehr gegenüber dem Strombezug Kostenvorteile erwirken können (DEUTSCHER INDUSTRIE- UND HANDELSKAMMERTAG E. V. 2018).

Neben Eigenerzeugungsanlagen können auch Stromspeicher zu Kosteneinsparungen bei der elektrischen Energieversorgung von Unternehmen führen. Beispielsweise kann den in Abschnitt 2.1.2 beschriebenen kostenintensiven Lastspitzen durch gezielte Speicherentladungen entgegengewirkt werden. Daneben können Speichersysteme den Anteil der Eigenerzeugung an der Deckung des Strombedarfs erhöhen, indem die Lade- und Entladevorgänge an das Erzeugungs- und Lastverhalten der Anlagen des Unternehmens angepasst werden. (PHILIPP ET AL. 2022, VDI ZRE 2018) Knapp 10 Prozent der in der DIHK-Studie befragten Unternehmen verfügen über einen Stromspeicher oder ein Speicher befand sich zum Zeitpunkt der Befragung im Aufbau. Weitere 19 Prozent planten die Anschaffung eines Stromspeichersystems. (DEUTSCHER INDUSTRIE- UND HANDELSKAMMERTAG E. V. 2021) Energiespeichertechnologien können nach der physikalischen Form der gespeicherten Energie unterschieden werden. Elektrische Speicher eignen sich für die kurzfristige Speicherung von Energie mit Hilfe von Spulen oder Kondensatoren. Mechanische Systeme speichern Energie in Form von potenzieller oder kinetischer Energie, beispielsweise in Form von Pumpspeicherkraftwerken bzw. Schwungradmassenspeichern. Elektrochemische Speicher, eine Untergruppe der chemischen Speicher, halten die Energie in Form von chemischen Verbindungen vor. (STERNER 2017, 36 ff.) Dazu gehören auch die in der Industrie weit verbreiteten Lithium-Ionen-Batterien, die vergleichsweise hohe Energiedichten und eine geringe Selbstentladungsrate vorweisen (VDI ZRE 2018). Neben stationären Lithium-Ionen-Batterien können perspektivisch auch die Fahrzeugbatterien von Elektrofahrzeugen an das betriebliche Energiemanagement angebunden werden und durch gezielte Lade- und gegebenenfalls Entladevorgänge zur energiewirtschaftlichen Optimierung der Unternehmen beitragen (ROTH ET AL. 2018, BETZ & LIENKAMP 2016, BEIER ET AL. 2016). Batteriespeicher bieten Industriebetrieben generell vielfältige Anwendungen wie beispielsweise die intensive Netznutzung oder die atypische Netznutzung in Kombination mit der Vermarktung von Regelleistung. Nähere Informationen dazu finden sich in PHILIPP ET AL. 2022. Im Zuge dieser Arbeit werden Batteriespeicher in das Risikomanagementsystem für die energieorientierte PPS eingebunden, da deren Kapazität für gezielte Lade- und

Entladevorgänge zur Kompensation von Auswirkungen auf energetische Zielgrößen genutzt werden kann.

2.2 Energieorientierte Produktionsplanung und -steuerung (PPS)

2.2.1 Ziele und Modelle der PPS

Nach WIENDAHL (2010) hat die PPS in einem Unternehmen die Aufgabe, die Art und Menge des laufenden Produktionsprogramms in regelmäßigen Abständen für mehrere Planungsperioden unter Beachtung gegebener Kapazitäten voranzuplanen und diese trotz unvermeidlicher Störungen möglichst gut zu realisieren. Sie verfolgt ein Zielsystem, in dem eine möglichst hohe Logistikleistung im Zielkonflikt mit den Logistikkosten steht (vgl. Abbildung 4). Die Logistikleistung beinhaltet die vom Markt wahrgenommenen Faktoren der hohen Liefertreue und der kurzen Lieferzeiten. Diese erfordern intern eine hohe Termintreue und kurze Durchlaufzeiten. Die möglichst gering zu haltenden Logistikkosten bestehen aus den beiden Komponenten der Kapitalbindungskosten und den logistikbedingten Prozesskosten. Erstere sinken durch niedrige Bestände, letztere werden durch eine hohe Auslastung positiv beeinflusst. (WIENDAHL 2010, 251 ff.)

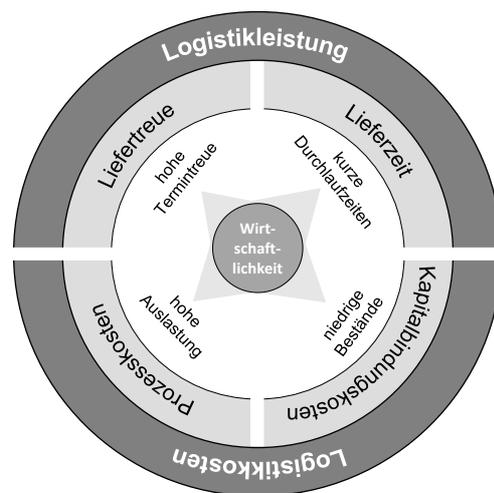


Abbildung 4: Zielkonflikt von Logistikleistung und Logistikkosten (angelehnt an WIENDAHL 2010, S. 252)

Zu den operativen Aufgaben, dem formalen Vorgehen sowie den zu berücksichtigenden Regelgrößen existieren in der Literatur verschiedene, teilweise aufeinander aufbauende Ansätze. Das Funktionsmodell nach HACKSTEIN (1989) unterscheidet zunächst die Teilgebiete Produktionsplanung und Produktionssteuerung (vgl. Abbildung 5).

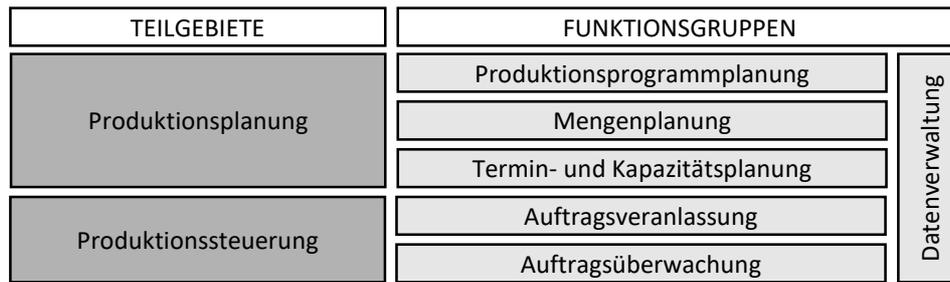


Abbildung 5: PPS-Modell nach Hackstein (angelehnt an HACKSTEIN 1989)

Die Produktionsplanung verfolgt insbesondere die Planung des Produktionsablaufs mittels der Funktionsgruppen der Produktionsprogrammplanung, der Mengenplanung sowie der Termin- und Kapazitätsplanung. Die Produktionssteuerung regelt im Rahmen der Funktionsgruppe Auftragsveranlassung die kurzfristige Durchsetzung des Fertigungsprogramms bei Störungen und Planungsungenauigkeiten durch situative Anpassungen. Mit der Funktionsgruppe Auftragsüberwachung werden unter anderem der Stand der Kundenaufträge, der Abarbeitungsgrad sowie der Auftragsstatus verwaltet und überwacht. Die Datenverwaltung ist beiden Teilgebieten zugeordnet, da sie gleichermaßen auf auftragsabhängige oder auftragsneutrale Daten zugreifen, wie z.B. Stücklisten, Arbeitspläne, Stückzahlen und Maschinenkapazitäten. (HACKSTEIN 1989, 5 ff.)

Das Modell von LÖDDING (2016) fokussiert die Produktionssteuerung (vgl. Abbildung 6), da diese unter anderem robuste Planungssysteme bei Ausfall von Maschinen und Mitarbeitern oder Ausfall von Materialien ermöglicht, indem sie mit schnellen und effektiven Planänderungen darauf reagiert (LÖDDING 2016, S. 3).

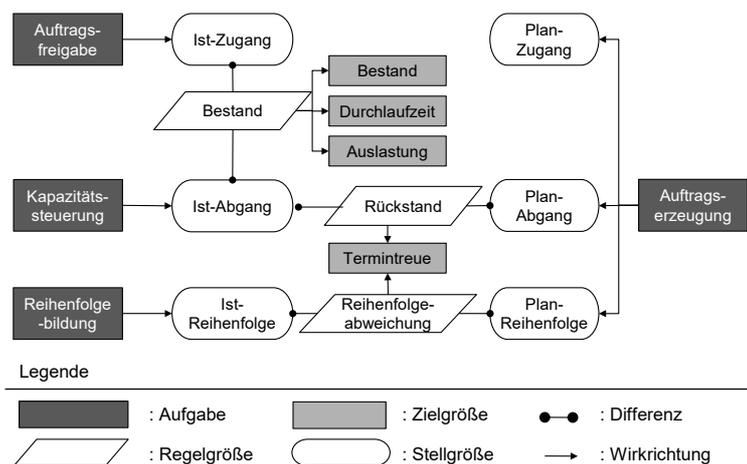


Abbildung 6: Modell zur Produktionssteuerung (angelehnt an LÖDDING 2016, S. 8)

Das Modell verfolgt den Ansatz, die in Abbildung 4 vorgestellten Logistikziele (niedriger Bestand, kurze Durchlaufzeit, hohe Auslastung und hohe Termintreue) durch die Fertigungssteuerung aufzuzeigen und positiv zu beeinflussen. Die Zielgrößen werden durch Regelgrößen bestimmt, die sich wiederum aus der Abweichung von zwei Stellgrößen ergeben. Die

Stellgrößen werden durch Aufgaben festgelegt. Damit bildet das Modell in Abgrenzung zur Produktionsplanung, welches die Planwerte der Stellgrößen festlegt, die Grundlage für ein Regelsystem zur Produktionssteuerung, das auf tatsächliche Ist-Werte reagiert (LÖDDING 2016, 8 ff.).

Das sogenannte Aachener PPS-Modell ist insbesondere im deutschsprachigen Raum weit verbreitet (LÖDDING 2016, S. 6) und verfolgt den Anspruch, wissenschaftliche Vollständigkeit und praxisnahe Anwendungsorientierung zu bieten (SCHUH & STICH 2012). Es baut auf etablierte Modelle wie z.B. auf das vorgestellte PPS-Modell nach HACKSTEIN (1989) und wird seit der 1998 veröffentlichten ersten Auflage stetig weiterentwickelt und erweitert (SCHUH & STICH 2012). Aus diesen Gründen fußen die Definitionen und Konzepte dieser Arbeit im Wesentlichen auf dem Aachener PPS-Modell.

Das Aachener PPS-Modell betrachtet die vier Referenzsichten Aufgabensicht, Prozesssicht, Prozessarchitektursicht und Funktionssicht. Durch die Aufgabensicht werden die Aufgaben der PPS allgemeingültig und hierarchisch spezifiziert und detailliert. Die Prozesssicht leitet aus diesen Aufgaben Prozesse ab und bringt sie in eine zeitlich-logische Ordnung. Als Bindeglied zwischen Aufgabensicht und Prozesssicht wurde die Prozessarchitektursicht mit dem Ziel eingeführt, die Schnittstellen zwischen der Netzwerkebene und der Unternehmensebene abzubilden. Mit der Funktionssicht werden die Anforderungen an die IT-Systeme zur Unterstützung aller PPS-Aktivitäten beschrieben (SCHUH & STICH 2012, 18 ff.). Für diese Arbeit sind insbesondere die Aufgabensicht und die Prozesssicht relevant, da sie die Ableitung der Aufgaben und Zielgrößen des Systems zur Risikobehandlung bzw. dessen zeitlich-logische Einordnung ermöglichen.

Die Aufgabensicht des Aachener PPS-Modells unterscheidet Netzwerkaufgaben, Kernaufgaben und Querschnittsaufgaben. In den Kernaufgaben sind neben der Produktionsprogrammplanung und der Produktionsbedarfsplanung auch die Fremdbezugsplanung und -steuerung sowie die Eigenfertigungsplanung und -steuerung enthalten (SCHUH & STICH 2012, S. 21).

Das vorliegende System zur Risikobehandlung ist auf die Anwendung im Rahmen der Eigenfertigungsplanung ausgelegt, da deren Entscheidungen wesentliche Auswirkungen auf die kurzfristige Strombeschaffung am in Abschnitt 2.1.2 beschriebenen Day-Ahead und Intraday-Markt haben und der zeitliche Verlauf der Eigenfertigungsplanung korrigierende Maßnahmen mit Wechselwirkungen zu diesen Märkten erlaubt (ROTH & REINHART 2019, KELLER 2018). Wie in Abbildung 7 schematisch dargestellt, ist letzterer Aspekt insbesondere durch die Unteraufgaben Feinterminierung (Ermittlung der Start- und Endtermine von Arbeitsgängen), Ressourcenfeinplanung (Abstimmung von Kapazitätsbedarf und Kapazitätsangebot) und Reihenfolgeplanung (Entwicklung der optimalen Abarbeitungsreihenfolge) gegeben (SCHUH & STICH 2012, 54 ff.).

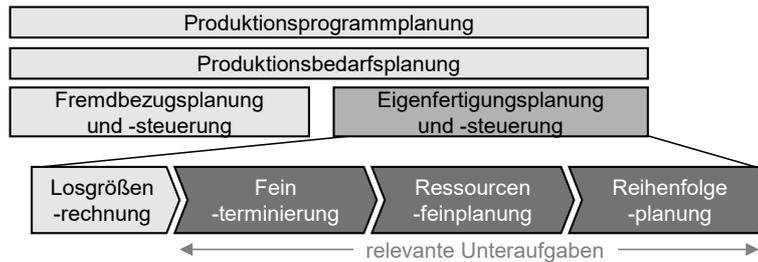


Abbildung 7: Relevante Unteraufgaben des Systems im Rahmen der Eigenfertigungsplanung und -steuerung (angelehnt an SCHUH & STICH 2012)

Um ein eigenständiges Risikomanagementsystem zu entwickeln, welches als Ergänzung zu bestehenden PPS-Systemen Verwendung finden kann, ist es für die Anwendung an der Schnittstelle zwischen Produktionsplanung und Produktionssteuerung zu konzipieren. Das Aachener PPS-Modell unterscheidet nicht konkret zwischen Planung und Steuerung, jedoch wird angelehnt an dessen Prozessmodell die Schnittstelle wie folgt definiert:

Als die Schnittstelle zwischen Produktionsplanung und Produktionssteuerung wird die Übergabe des durch die Reihenfolgeplanung entstandenen Werkstattauftrags an die Fertigung verstanden, nachdem dieser die Auftragsfreigabe erhalten hat.

2.2.2 Energieflexibilität und Energieorientierung in der PPS

Der Ausbau der witterungsabhängigen regenerativen Energieerzeugung aus Wind und Sonne führt zu einer zunehmend volatilen Einspeisung in die Elektrizitätsnetze. Die Herausforderung bei der Aufrechterhaltung eines stabilen Energiesystems liegt in der Balance zwischen Erzeugung und Verbrauch im Energiesystem. Da die regelbare Kraftwerkskapazität im Rahmen der Energiewende stetig abnimmt, müssen verstärkt Anpassungen auf der Verbrauchsseite zur Stabilität des Systems beitragen. (ROTH ET AL. 2020c) Eine Lösung hierzu verspricht das sogenannte Demand Side Management, das eine Reihe von Maßnahmen zur Beeinflussung der Energienachfrage beinhaltet. Diese reichen von permanenten Energieeffizienzmaßnahmen bis hin zu dynamischem Lastmanagement mit der Anpassung des Lastgangs als Reaktion auf Marktanreize oder Netzanforderungen. (PALENSKY & DIETRICH 2011). Grundvoraussetzung für Lastmanagement sind in der Industrie insbesondere die Möglichkeit zur Speicherung, beispielsweise durch Material-, Wärme- und Kältespeicher, oder ein nicht vollständig ausgelastetes Produktionssystem, das Verschiebungen der Aufträge zulässt (LUND ET AL. 2015). Unabhängig von Lastmanagementanwendungen lässt sich die Fähigkeit eines Produktionssystems zur schnellen und aufwandsarmen Anpassung an sich ändernde Einflussfaktoren mit dem Begriff der Flexibilität beschreiben (NYHUIS ET AL. 2008, S. 24). Diese Beschreibung wurde von REINHART & GRABL (2012) in den Kontext der elektrischen Leistungs- und Energiebedarfsanpassung gesetzt und für die Beschreibung der Energieflexibilität herangezogen. Die Energieflexibilität steht nach GRABL (2015) für die Fähigkeit eines Produktionssystems, sich schnell und mit geringem finanziellen Aufwand an die Veränderungen im Stromangebot anpassen zu können. Er beschrieb u.a. basierend auf

SETHI & SETHI (1990) Flexibilitätsarten wie die Mengenflexibilität, Maschinenflexibilität und Routenflexibilität und führte generelle Flexibilitätsmaßnahmen für Produktionssysteme auf. Zu diesen sogenannten Energieflexibilitätsmaßnahmen, die in die VDI 5207-1 (2020) eingingen, gehören beispielsweise die Unterbrechung von Aufträgen, die Verschiebung von Auftragsstarts, oder die Anpassung von Prozessparametern. Arbeiten zur energieorientierten Produktionsplanung (KELLER 2018) und zur energieorientierten Produktionssteuerung (SCHULTZ 2018) griffen die Energieflexibilitätsmaßnahmen zur Umsetzung einer energieorientierten PPS auf. Angelehnt an SCHULTZ (2018, S. 36) wird in dieser Arbeit die energieorientierte PPS wie folgt definiert:

Bei der energieorientierten PPS handelt es sich um etablierte PPS-Modelle, die um Energiekennzahlen und spezifische Vorgehen ergänzt wurden, um energiebezogene Einfluss- und Zielgrößen bei den Planungs- und Steuerungsaufgaben zu berücksichtigen.

Nach diesem Verständnis kann beispielsweise im Rahmen der Produktionsplanung ein Modul eingerichtet werden, das die Aufträge mit dem jeweiligen Stromverbrauch der Produktionsstationen unter Berücksichtigung von Strompreisprognosen kostenoptimiert einplant. In der Produktionssteuerung werden erforderliche Anpassungen bei möglichen Abweichungen vom Plan vorgenommen, um die logistischen Ziele bei niedrigen Energiekosten weiterhin möglichst gut zu erreichen (KELLER ET AL. 2016). Eine Übersicht über Ansätze der energieorientierten Produktionsplanung findet sich in TERBRACK ET AL. (2021).

Um den Handlungsspielraum der energieorientierten PPS zu erfassen, ist die Identifikation und Bewertung der spezifischen Energieflexibilitätsmaßnahmen des betrachteten Produktionssystems erforderlich. Hierzu bietet beispielsweise die VDI 5207-2 (2021) ein strukturiertes Vorgehen und SCHOTT ET AL. (2019) ein spezifisches Datenmodell zur mathematischen Beschreibung von Maßnahmen. In der betrieblichen Praxis besteht ein theoretisches Energieflexibilitätspotenzial als rechnerische Größe der aktuellen Last und der durch die installierte Anlagenleistung erreichbare Lasterhöhung bzw. der Reduktion der Anlagenleistung. Es gilt jedoch sicherheits-, produkt- und anlagenrelevante Restriktionen zu berücksichtigen, sodass ein technisches Potenzial eingegrenzt werden kann. Es folgt eine weitere Eingrenzung des technischen Potenzials in Form einer Teilmenge (sogenanntes praktisches Potenzial) durch unternehmensinterne, regulatorische und administrative Hemmnisse sowie einer Teilmenge, eingegrenzt durch die Möglichkeit zur Generierung von Erlösen (sogenanntes wirtschaftliches Potenzial). Die Schnittmenge des praktischen und wirtschaftlichen Potenzials ergibt das realisierbare Potenzial an Energieflexibilität im Produktionssystem. (DUFTER ET AL. 2017, S. 9)

2.2.3 Risiken im Umfeld der energieorientierten PPS

Die durch die PPS erstellten Produktionspläne unterliegen grundsätzlich dem Risiko, beispielsweise in Form von Störungen an Produktionsanlagen, die zuvor erläuterten logistischen Ziele nach WIENDAHL 2010 zu verfehlen. Beispielsweise können sich Liefertermine gegenüber Kunden verzögern oder hohe Bestände an Vorprodukten anhäufen.

Für eine Vielzahl der Unternehmen stellt auch die Überschreitung der Jahreshöchstlast z.B. durch den zunächst nicht vorgesehenen kurzfristigen Einsatz einer Produktionsanlage ein Risiko mit deutlichen Auswirkungen auf die Netzentgelte dar. Aufgrund der geschilderten Verpflichtungen komplexer Strombeschaffungsmodelle stellen auch Pönalen für Abweichungen vom geplanten und mittels Stromeinkauf gedeckten elektrischen Energieverbrauch ein Risiko dar, das durch unerwartete Ereignisse im Produktionsverlauf ausgelöst werden kann. Abbildung 8 stellt dieses Konfliktfeld möglicher Risikoauswirkungen auf logistische und energetische Kennzahlen im Umfeld der energieorientierten PPS schematisch dar.

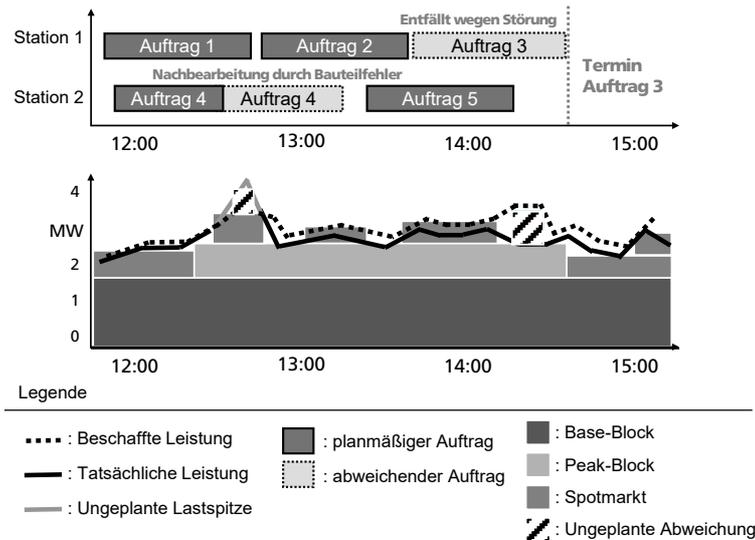


Abbildung 8: Störungen im Produktionsablauf mit Auswirkungen auf die Strombeschaffung (angelehnt an KONSTANTIN 2017, S. 456, ROTH & REINHART 2019 und ROTH ET AL. 2021)

Im vereinfachten Produktionsplan im oberen Teil der Abbildung führt eine Störung an Station 1 zu einem Ausfall von Auftrag 3, dessen Liefertermin dadurch nicht eingehalten werden kann. Auftrag 4 wird aufgrund eines Bauteilfehlers an Station 2 nachbearbeitet. Beide Ereignisse führen zu einer Diskrepanz zwischen der beschafften Verbrauchsleistung und der tatsächlichen Leistung und somit zu ungeplanten Abweichungen (siehe unterer Teil der Abbildung). Die Nachbearbeitung an Station 2 führt weiterhin zu einer ungeplanten Lastspitze, welche die neue Jahreshöchstlast bildet und so zu einer Erhöhung der Netzentgelte führt.

Das Modell von WIENDAHL ET AL. (2007) unterscheidet unterschiedliche Ebenen um eine Fabrik zu strukturieren. Dieses Modell wird im weiteren Verlauf zur Einordnung von Betrachtungsräumen herangezogen. Der Energiebezug und das Energiemanagement wird auf der Ebene der Fabrik betrachtet, da die Auswirkungen von Lastspitzen oder der Einfluss von Eigenerzeugungsanlagen und Energiespeichern ganzheitlich für einen Standort zu betrachten sind (MÜLLER ET AL. 2009). Als wesentliche Eingrenzung für die Einflüsse der PPS wird das Produktionssystem betrachtet, da es zusammenhängende Zellen und Stationen beinhaltet, um ein Produkt oder Teilprodukt zu fertigen (WIENDAHL 2010). Störungen finden zu meist auf der Ebene der Stationen statt, also ausgelöst durch Maschinen oder Werkzeuge (WIENDAHL ET AL. 2007).

2.3 Risikomanagement in der Produktion

2.3.1 Grundlagen des Risikomanagements

Der Begriff des Risikomanagements umfasst ein weites Spektrum an Aufgaben und Zielsetzungen, die zum einen sehr generisch und allgemeingültig, zum anderen jedoch für sehr spezifische Branchen und Anwendungsbereiche formuliert sein können. In der Literatur findet sich eine Vielzahl von Definitionen des Begriffs „Risiko“ und der damit verbundenen Klassifizierungen, Analysen und Vorgehen im Rahmen des Risikomanagements. Eine einheitliche Definition existiert nicht, vielmehr sind die Begriffe für das Umfeld der Anwendung und den vorgesehenen Zweck zu definieren. Die Definitionen des Begriffs „Risiko“ haben zumeist gemein, dass sie die Auswirkungen von Unsicherheiten auf Ziele beschreiben und in Form einer Wahrscheinlichkeit für das Eintreten eines Ereignisses und dessen Auswirkungen in Form einer Abweichung von Erwartungen dargestellt werden. Diese generelle Definition entspricht beispielsweise der DIN ISO 31000 (2018), welche die Leitlinien für Organisationen im Umgang mit Risiken festlegt. Diese können bei der Anwendung an den jeweiligen Kontext der Organisation angepasst werden. (DIN ISO 31000 2018). Unter dem Risikomanagement werden im Zuge dieser Richtlinie „koordinierte Aktivitäten zur Lenkung und Steuerung einer Organisation in Bezug auf Risiken“ verstanden. Mit der Ausrichtung auf die Verfehlung von Zielen ist die Richtlinie der wirkungsbezogenen Kategorie zuzuordnen, zu der verschiedene anwendungsorientierte Ansätze des Risikomanagements gehören wie beispielsweise DIEDERICHS (2013).

Neben der wirkungsbezogenen Definition kann sich eine Definition auch an den Ursachen orientieren und sich somit auf die zur Verfügung stehenden Informationen bei der Entscheidungsfindung beziehen. Der Umweltzustand beschreibt in der Entscheidungstheorie die Kombination von Ausprägungen der Daten, von denen die Ergebnisse der möglichen Entscheidungsalternativen abhängen. Ist der Umweltzustand bekannt, wird eine Entscheidung unter Sicherheit getroffen. Sind mehrere Umweltzustände möglich, so spricht man von einer Entscheidung unter Unsicherheit. Eine Risikosituation entsteht, wenn der Entscheider in der Lage ist, den Umweltzuständen Eintrittswahrscheinlichkeiten zuzuordnen. (LAUX ET AL. 2018, S. 58)

Für diese Wahrscheinlichkeiten können wiederum jene objektiver und subjektiver Art unterschieden werden. Folgen die Wahrscheinlichkeiten statistischen Ausprägungen, sind sie intersubjektiv, d.h. durch andere überprüfbar und somit objektiv. In der Realität und insbesondere in ökonomischen Entscheidungssituationen treten diese jedoch selten auf. Können Wahrscheinlichkeiten aufgrund von Erfahrungen und Glaubwürdigkeitsvorstellungen einzelner Experten aufgestellt werden, so sind diese Wahrscheinlichkeiten subjektiv. (LAUX ET AL. 2018, S. 103)

Ansätze des Risikomanagements greifen häufig auf eine Kombination der wirkungs- und ursachenorientierten Definition zurück, damit Modellierungen in Form von Zielverfehlungen gleichermaßen ermöglicht werden wie die Unterscheidung von Sicherheiten, Unsicher-

heiten und Risiken im Rahmen der Entscheidungstheorie. In der Literatur finden sich spezifische Ansätze für unterschiedliche Branchen und Unternehmensbereiche. Beispiele sind OEHLER & UNSER (2002), die ein Risikomanagement für die Banken- und Versicherungsbranche vorstellten, EISELBRECHER (2020), der strategische Risiken für Verteilnetzbetreiber in liberalisierten Strommärkten betrachtete, oder VERSTEEGEN (2003) mit einem Risikomanagement für IT-Projekte. Auch für das Umfeld der Produktion findet sich eine ausgeprägte Basis an Arbeiten, die im Rahmen von Abschnitt 2.3.3 näher erläutert werden.

2.3.2 Prozess des Risikomanagements

Für die Strukturierung der Aufgaben und des Ablaufs des Risikomanagements bestehen in der Literatur vielfältige Prozessbeschreibungen, die stets auf den Schritten der Identifikation, Analyse, Bewertung, Handhabung und Überwachung basieren. Häufig treten begriffliche Abweichungen auf, jedoch führen diese zu keinen größeren inhaltlichen Abweichungen. (STEINMETZ 2007, S. 18) SCHNORRENBURG & GOEBELS (1997) strukturierten den Prozess des Risikomanagements beispielsweise durch die drei übergeordneten Prozessschritte Risikoidentifikation, Risikoanalyse und Risikobehandlung.

Die DIN ISO 31000 (2018) verfolgt mit der Trennung von Risikobeurteilung und Risikobehandlung einen vergleichbaren Prozess. Die Risikobeurteilung enthält die Schritte Risikoidentifikation, Risikoanalyse und Risikobewertung. Sie sollte „systematisch, iterativ und kollaborativ unter Nutzung der Kenntnisse und Ansichten der Stakeholder durchgeführt werden“ und die besten verfügbaren Informationen verwenden. Die darauffolgende Risikobehandlung besteht wiederum aus der Formulierung und Auswahl von Risikobehandlungsoptionen, der Planung und Implementierung der Risikobehandlung, der Beurteilung der Wirksamkeit sowie der Entscheidung, ob das verbleibende Risiko akzeptabel ist. Sofern dies nicht der Fall ist, werden weitere Behandlungen vorgenommen (DIN ISO 31000 2018).

Das Vorgehen und die generellen Optionen zur Risikobehandlung sind in Abbildung 9 aufgeführt. Im Rahmen dieser Arbeit werden als mögliche Optionen der Risikobehandlung die Veränderung der Wahrscheinlichkeit und Auswirkungen sowie das Beibehalten des Risikos herangezogen. Optionen wie die Vermeidung einer Aktivität und das gemeinsame Tragen des Risikos durch Versicherungen liegen nicht im Entscheidungsfeld der PPS, sondern obliegen strategischen Unternehmensbereichen. Die Beseitigung einer Risikoursache liegt im Aufgabenbereich der Instandhaltung oder für langfristige Risiken im Bereich der Fabrikplanung. Die PPS kann hierbei als Hinweisgeber unterstützen, kann jedoch im operativen Geschäft nicht auf diese Option zurückgreifen.



Abbildung 9: Prozess des Risikomanagements und Optionen der Risikobehandlung (angelehnt an DIN ISO 31000 2018)

2.3.3 Ansätze des Risikomanagements für produzierende Unternehmen

Die Literatur bietet eine Vielzahl an Arbeiten, die spezifische Methoden des Risikomanagements für das Umfeld der produzierenden Unternehmen bieten. Diese haben zumeist gemeinsam, dass sie auf etablierten Ansätzen und Werkzeugen des Risikomanagements aufbauen und um produktionstechnische Modelle und Begrifflichkeiten erweitert sowie um relevante Ziel- und Einflussgrößen der Produktion ergänzt werden.

Mit der Arbeit von STROHMEIER (2007) wurden dem St. Galler Management-Konzept (BLEICHER 2004) Elemente des Risikomanagements zugeordnet, um darauf basierend ein ganzheitliches industrielles Risikomanagement zu entwickeln. Entsprechend den universellen Managementebenen wird zwischen normativem, strategischem und operativem Risikomanagement unterschieden. Die normative Ebene des Risikomanagements enthält die Festlegung der Risikomanagementpolitik mit entsprechendem Leitbild. Auf der strategischen Ebene werden übergeordnete Ziele, Programme und die Finanzierung des Risikomanagements erarbeitet. Das operative Risikomanagement verfolgt den Risikomanagementprozess. (STROHMEIER 2007, S. 88) Zu diesem gehört die Analyse von Risiken für einen abgegrenzten Unternehmensbereich im Gegensatz zur gesamtunternehmensbezogenen strategischen Ebene. Am Beispiel der Instandhaltung wird vorgeschlagen, mittels eines Screenings zunächst risikorelevante Anlagen zu untersuchen um einen Überblick auf der Anlagenebene zu erhalten. Daraufhin erfolgt die Analyse tiefergehender Ebenen, wie Teilanlagen, Baugruppen und Bauelemente. Zur Strukturierung und Bewertung identifizierter Risiken werden etablierte Instrumente, wie die Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) nach DIN EN 60812 (2006) oder die Fehlerbaumanalyse nach DIN EN 61025-08 (2007), vorgeschlagen. (STROHMEIER 2007, 147 f.) Bei der Risikoidentifikation sind in Unternehmen nach DIEDERICHS (2013) auch scheinbar unwesentliche Risiken zu berücksichtigen, da sie sich bei gemeinsamen Auftreten oder durch Wechselwirkungen mit anderen Risiken als Bedrohung von Unternehmenszielen herausstellen können.

Nach der Identifikation von Risiken erfolgt im Rahmen der Risikobeurteilung zumeist eine Analyse und Bewertung der Risiken. Entsprechend der Definition eines Produktionssystems mit Eingang und Ausgang von Ressourcen bzw. Produkten und der Verarbeitung unterschiedlicher ROGLER (2002) Beschaffungsrisiken, Produktionsrisiken und Absatzrisiken. In der PPS hat die Fremdbezugsplanung Einfluss auf die Beschaffungsrisiken, die Absatzrisiken liegen im Spektrum des Vertriebs. Die Eigenfertigungsplanung hat wesentlichen Einfluss auf die Produktionsrisiken, die daher den Rahmen der Betrachtung dieser Arbeit bilden. Aufbauend auf der Strukturierung von ROGLER (2002) differenzierte STEINMETZ (2007) bei den Produktionsrisiken weiterhin die Produktionsfaktorenrisiken, Produktionsprozessrisiken und Produktrisiken in Anlehnung an HÄRTERICH (1987), der die Begrifflichkeiten Input-Risiken, Kombinationsrisiken und Output-Risiken verwendete. (STEINMETZ 2007, 80 ff., HÄRTERICH 1987, S. 90) Inputrisiken beschreiben im Wesentlichen den Verlust oder die Beschädigung von bezogenen Produktionsfaktoren und Output-Risiken beziehen sich auf den Verlust oder die Beschädigung von erstellten Produkten sowie unnötigen Aufwand durch nicht mehr benötigte Produkte. Die Prozessrisiken beziehen sich auf den eigentlichen Zeitraum der Produktion und enthalten alle möglichen Störungen des Produktionsprozesses. (ROGLER 2002, 143 f.) Störungen sind zeitpunktbezogene Fehler, welche nach ISO 9000:2005 (2005) wiederum nicht erfüllten Anforderungen entsprechen (GENC 2015, S. 36). Ursachen der Störungen sind dabei menschliche Faktoren, Betriebsmittel, Werkstoffe und Informationen zuzuordnen. Ein weiteres wichtiges Unterscheidungsmerkmal ist die Unterteilung in Primärstörungen, die nicht durch andere Störungen verursacht wurden sowie Sekundärstörungen als Folge von vorangegangenen Störungen. (SCHWARTZ 2004, 70 f.) Ausgehend von den in Abschnitt 2.2.3 beschriebenen Ebenen sind Störungen meist den Stationen zuzuordnen (WIENDAHL 2010) und daher ein wesentlicher Faktor im Risikomanagement in der PPS, welche wie in Abschnitt 2.2.1 beschrieben, die Aufgaben der Zuordnung von Aufträgen zu Stationen und Reihenfolgebildung verantwortet. Im Folgenden werden die im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Produktionsrisiken unter nachfolgender Definition verstanden.

Produktionsrisiken sind durch Eintrittswahrscheinlichkeiten und erwartete Abweichungen von einem Zielwert beschriebene Störungen des Produktionsprozesses, welche im Rahmen des Einflussbereichs der energieorientierten PPS behandelt werden können.

Zur Behandlung der Risiken bieten sich die in Abschnitt 2.3.2 vorgestellten Optionen, von denen die PPS insbesondere die Veränderung der Wahrscheinlichkeit und Auswirkungen heranziehen kann. Analog zu den Risiken gilt es auch geeignete Maßnahmen zu identifizieren und hinsichtlich deren Auswirkungen zu bewerten. Energieflexible Produktionssysteme können für die Erstellung eines Maßnahmenkatalogs zur Risikobehandlung auf verfügbare Energieflexibilitätsmaßnahmen, die anhand ihrer Auswirkungen auf logistische sowie energetische Größen modelliert sind, zurückgreifen (vgl. Abschnitt 2.2.2).

Geeignete und verfügbare Maßnahmen können über zwei Einsatzstrategien eingesetzt werden. Präventive Maßnahmen werden vor dem Eintreten eines Risikos eingesetzt und können die Eintrittswahrscheinlichkeit und Auswirkungen beeinflussen. Reaktive Maßnahmen

kommen nach Eintreten des Risikos zum Einsatz, um die Schadensauswirkungen zu begrenzen. (SCHWARTZ 2004, KÖNIG 2008, ROTH ET AL. 2022) Bestimmte Maßnahmen eignen sich für beide Strategien. So kann die Anpassung von Prozessparametern vorab eingeplant oder auch situativ beim Eintreten einer Störung eingesetzt werden. Andere Maßnahmen sind aufgrund des erforderlichen zeitlichen Vorlaufs nur präventiv einsetzbar, beispielsweise die Anpassung von Schichtzeiten. Ein Beispiel für eine Maßnahme, die technisch und wirtschaftlich in den meisten Produktionssystemen ausschließlich reaktiv sinnvoll ist, stellt die Unterbrechung eines Prozesses dar. (ROTH ET AL. 2022) Um den Wirkungsbereich des Risikomanagementsystems für die energieorientierte PPS möglichst groß zu gestalten, sind durch die Konzeption sowohl präventive als auch reaktive Strategien zu ermöglichen.

Basierend auf den vorangegangenen Erläuterungen und mit den zusammengefassten Eingrenzungen des Abschnitts 2.3 wird der Begriff des Risikomanagements im Rahmen dieser Arbeit wie folgt definiert.

Das Risikomanagement identifiziert, analysiert und bewertet Produktionsrisiken und behandelt diese durch die Veränderung der Eintrittswahrscheinlichkeit und der Auswirkungen mittels präventiver und reaktiver Maßnahmen im Rahmen des operativen Betriebs der energieorientierten PPS.

2.4 Fazit

Dieses Kapitel verfolgte das Ziel, ein Verständnis für die relevanten Bereiche des industriellen Energiemanagements, der energieorientierten PPS und des Risikomanagements zu schaffen. Die Energiebeschaffungsmodelle der Industrie wurden beschrieben und in ihren Grundzügen erläutert. Sie sind vielfältig und bieten Möglichkeit zur Reduktion von Kosten durch einen bewussten und strukturierten Einsatz von Energie. Nicht nur die Reduktion des elektrischen Energieverbrauchs durch Energieeffizienz, auch die zeitliche Anpassung des Stromverbrauchs an Preisprognosen erwirkt Kostensenkungen. Andererseits bieten die Beschaffungsmodelle auch Risiken, die zu erhöhten Kosten führen können. Insbesondere Pönalen für Abweichungen von der beschafften Strommenge und eine Erhöhung der Jahreshöchstlast mit Auswirkungen auf die Netzentgelte sind hervorzuheben. Die energieorientierte PPS hat einen wesentlichen Einfluss auf die Nutzbarkeit der Strombeschaffungsmodelle und deren erfolgreiche Anwendung. Es wurde dargelegt, wie die grundsätzlichen Modelle der PPS aufgebaut sind und welche Aufgaben und Ziele verfolgt werden. Die Eigenheiten und spezifischen Kennzahlen der energieorientierten PPS in energieflexiblen Produktionssystemen wurden erläutert. Es wurde beschrieben, welche Risiken innerhalb der PPS auftreten können und weshalb die energieorientierte PPS den geeigneten Rahmen für die Implementierung eines Risikomanagementsystems bietet. Bei der Beschreibung der Grundlagen des Risikomanagements wurden der Risikomanagementprozess und gängige Ansätze für die einzelnen Prozessschritte erläutert. Die Produktionsrisiken wurden von anderen Risikofaktoren abgegrenzt und verfügbare Optionen und Maßnahmen zur Risikobehandlung für die energieorientierte PPS wurden umrissen.

3 Stand der Forschung und Handlungsbedarf

3.1 Übergeordnete Ansätze für das Management von Störungen und Risiken in der PPS

3.1.1 Ansätze für das Management von Störungen

Das Störungsmanagement enthält Maßnahmen zur Vermeidung, Behebung und Folgenminimierung von Störungen und kann auf der taktischen, operativen und strategischen Ebene erfolgen, wobei letztere die Maßnahmen im Rahmen von PPS-Systemen enthält (EVERSHEIM 1992, 12 ff.). Ansätze des Störungsmanagements, welche für das Umfeld der PPS konzipiert wurden, sind daher relevant für die Bearbeitung der Forschungsfragen dieser Arbeit, welche nach Abschnitt 2.3.3 Produktionsrisiken als mit Eintrittswahrscheinlichkeiten und Auswirkungen modellierte Störungen betrachtet.

SCHWARTZ (2004) entwickelte ein Störungsmanagement, welches mittels eines Simulationsmodells Zufallsgrößen für Maschinen des Produktionssystems sowie für Aufträge abbildet. Das Simulationsmodell wurde genutzt, um im Rahmen von Simulationsstudien die Auswirkungen verschiedener Präventions- und Reaktionsstrategien zu ermitteln und so die geeigneten Strategien auswählen zu können.

Das System zur produktbasierten Steuerung von Abläufen in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage von OSTGATHE (2012) enthält ein wissensbasiertes System für das autonome Störungsmanagement. Basierend auf zu definierenden Regeln identifiziert es Merkmalsabweichungen und leitet mögliche Maßnahmen ab.

GENC (2015) entwickelte ein System für ein adaptives Störungsmanagement für Lieferketten. Frühwarninformationen werden genutzt, um unerwartete Ereignisse zu erkennen und trotz geringer Zeit- und Bestandsreserven zwischen einzelnen Unternehmen die Verspätung von Lieferungen zu reduzieren. Maßnahmen in Form von Veränderungen bei Aufträgen werden anhand von Adaptionskosten bewertet und mit den Störkosten der Ereignisse gegenübergestellt, um eine geeignete Entstörstrategie zu wählen.

Das System zur ereignisorientierten Produktionssteuerung von PIELMEIER (2019) enthält als zentrales Element eine Methode, mit der hinsichtlich ihres Auftretens und ihrer Auswirkungen klassifizierten Ereignissen mit Behandlungsmaßnahmen entgegengewirkt werden kann. Zur Identifikation der am besten geeigneten Maßnahmen werden die verfügbaren Maßnahmen mittels eines Kennzahlensystems anhand der Auswirkungen auf logistische Zielgrößen bewertet.

Die genannten Ansätze des Störungsmanagements fokussieren im wesentlichen reaktive Maßnahmen, welche beim Erkennen einer bevorstehenden Störung bzw. nach dem Eintreten einer Störung ausgeführt werden. Eintrittswahrscheinlichkeiten und ausgeprägte Wechselwirkungen zwischen Störungen und Maßnahmen werden nicht berücksichtigt. Weiterhin ha-

ben sie gemeinsam, dass logistische Zielgrößen im Vordergrund stehen, wodurch eine Übertragung auf die energieorientierte PPS aufgrund fehlender energiebezogener Eingangs- und Zielgrößen nicht möglich ist.

Verschiedene Ansätze fokussieren die Energieorientierung in der PPS und bringen hierzu insbesondere die erforderlichen Parameter in die Aufgaben der Produktionssteuerung ein.

SCHULTZ (2018) entwickelte ein System zur energieorientierten Produktionssteuerung, bestehend aus den Bestandteilen der energieorientierten Reihenfolgebildung, der hybriden Auftragsfreigabe und dem situativen Lastmanagement. Die Bestandteile verfolgen das Ziel, Abweichungen vom geplanten und beschafften Lastgang zu reduzieren und bilden damit den Rahmen für reaktive Maßnahmen innerhalb der Phasen der Produktionssteuerung. Präventive Maßnahmen können durch das System nur bedingt eingesetzt werden und das Lastmanagement ist ein eigenständiges Modul für sehr kurzfristige situative Maßnahmen.

WANG ET AL. (2019) entwickelten einen Ansatz für die Belegungsplanung, bei dem die Zielgrößen Durchlaufzeit sowie Energie- und Produktionskosten rollierend durch ein Multiagentensystem verfolgt werden. Die Einflüsse unerwarteter Ereignisse, wie Maschinenausfälle oder Eilaufträge, können durch die Anpassung der Agenten oder der Veränderung von deren Verhandlungsstrategien reduziert werden. Der Handlungsspielraum ist sehr stark auf reaktive Maßnahmen und auf Anpassungen bei der Maschinenbelegung begrenzt.

RÖSCH (2021) stellte eine multiagentenbasierte Produktionssteuerung für den Betrachtungshorizonts eines Tages vor und damit für kurzfristige reaktive Maßnahmen. Neben Produktionsstationen können auch Energiespeicher und kurzfristiger Ver- und Zukauf von elektrischer Energie zur Vermeidung von Lastgangabweichungen durch Agenten realisiert werden. Der Ansatz ist nicht mit der Produktionsplanung verknüpft und bietet damit keine Möglichkeit zur gezielten Umsetzung von präventiven Strategien. Das System zur Steuerung tritt in weiten Teilen in Konkurrenz zu bestehenden Systemen der Unternehmen und kann nur bedingt ergänzend eingesetzt werden.

3.1.2 Ansätze für das Management von Risiken

Das Risikomanagement erfolgt in den meisten Ansätzen der Literatur wie in Abschnitt 2.3.2 dargelegt einem meist ähnlich gestalteten prozessualen Aufbau. Die vielfältigen spezifischen Ansätze für unterschiedlichen Branchen und Unternehmensbereiche (siehe Abschnitt 2.3.1) zeigen, dass eine Adaption und Spezifizierung des Prozesses für die jeweiligen Zielsetzungen und Anforderungen erforderlich ist, um anwendbare Methoden für die Praxis bereitzustellen. Daher existieren in der PPS vielfältige Verfahren für das Risikomanagement. Ein großer Teil der Verfahren adressiert die Fremdbezugsplanung (vgl. z.B. OEHMEN ET AL. 2009, YOU ET AL. 2009, KHEMIRI ET AL. 2017). Im Folgenden werden jene Ansätze analysiert, welche insbesondere für die im Rahmen dieser Arbeit fokussierte Eigenfertigungsplanung ausgelegt wurden.

GEBHARD (2009) entwickelte einen Ansatz für die hierarchische Produktionsplanung bei Unsicherheit, bei dem Entscheidungsvariablen auf den unterschiedlichen Ebenen der Produktionsplanung szenarioabhängig modelliert werden, um robuste Planwerte an die untergeordnete Planungsebene übergeben zu können. Zu den Maßnahmen gehören beispielsweise die Verwendung von Sicherheitsbeständen, um auf Veränderungen bei der Nachfragemenge einzugehen. Der Ansatz stellt ein eigenständiges Vorgehen dar und betrachtet vorrangig die langfristigen Planungsaufgaben wie beispielsweise die Bildung von Losgrößen.

WANG ET AL. (2010a) stellten einen Ansatz vor, mit dem ein optimaler Produktionsplan unter Berücksichtigung von Risikofaktoren erstellt werden kann. Er basiert auf einem integrierten Optimierungsmodell und ist auf die Produktion von verderblichen Gütern ausgelegt. Der Ansatz lässt sich durch die damit verbundenen spezifischen Parameter des Modells nur stark eingeschränkt auf die Kennzahlen der energieorientierten PPS übertragen. Weiterhin fokussiert der Ansatz insbesondere die Optimierung von Losgrößen und damit nicht die im Rahmen der energieorientierten PPS wesentliche Feinplanung.

Der Risikomanagementansatz von AMORIM ET AL. (2013) beinhaltet ebenfalls für die Produktion von verderblichen Gütern ein risikoaverses Produktionsplanungsmodell. Das Modell berücksichtigt finanzielle und organisatorische Risiken und unterstützt die Belegungsplanung von Produktionslinien unter Kriterien wie der Sensibilität des Kunden für die Alterung eines Produkts, oder den erwarteten erzielbaren Preisen für frische und gealterte Produkte. Einzelne risikobezogene Formulierungen des Modells lassen sich in bestehende PPS-Systeme integrieren. Der Ansatz ist lediglich auf präventive Maßnahmen und stark auf produzierende Unternehmen von verderblichen Produkten ausgelegt, wodurch eine Anwendbarkeit im Umfeld der energieorientierten PPS und die Risikobehandlung durch reaktive Maßnahmen nicht gegeben ist.

HU & HU (2016) stellten einen Ansatz für die Losgrößen- und Reihenfolgeplanung vor, in dem Unsicherheiten in Form eines Szenariobaums dargestellt werden. Die hohe Anzahl an entstehenden Szenarien wird mittels der Methode Fast Forward Selection reduziert, bei der die Szenarien anhand ihres gewichteten Abstands der Eintrittswahrscheinlichkeiten bewertet und ausgewählt werden. Die gewählten Szenarien gehen als Unsicherheitsfaktor in die Erstellung eines optimalen Produktionsplans ein und werden mit präventiven Maßnahmen wie dem Anpassen der Produktionskapazität berücksichtigt. Der Ansatz beschränkt sich mit der Einordnung in die Produktionsplanung auf präventive Maßnahmen und stellt einen allein-stehenden Ansatz dar, der in weiten Teilen nicht in bestehende PPS-Systeme integriert werden kann, sondern diese ersetzen würde.

BRANDA ET AL. (2016) berücksichtigten im Rahmen der Auftragsplanung mögliche Verzögerungen in der Bearbeitungszeit von Aufträgen in Form von Unsicherheiten. Über eine mathematische Optimierung wird die Wahrscheinlichkeit maximiert, dass die Zuordnung von in ihrer Dauer unsicheren Aufträgen zu Stationen jederzeit realisierbar ist. Über Nebenbedingungen wird sichergestellt, dass produktionstechnische Voraussetzungen eingehalten werden wie beispielsweise die Zuordnung eines Auftrags zu jeweils einer Maschine. Die

mathematischen Formulierungen des Problems können in Teilen in etablierte PPS-Softwarelösungen integriert werden, jedoch sind Störungen lediglich als veränderte Dauer eines Auftrags abbildbar und die möglichen Maßnahmen ausschließlich präventiv.

Das System zur operativen Produktionsplanung von KLÖBER-KOCH (2021) stellt einen eigenständigen Ansatz zur Erstellung der Feinplanung dar, bei dem die Risikopräferenz der Entscheider in den Planungsprozess einfließt. Das Ergebnis stellt ein robuster Produktionsplan dar, der bei risikoaversen Entscheidern Flexibilität zur Reaktion auf unerwartete Ereignisse beinhaltet, beispielsweise in Form von Pufferzeiten zwischen Aufträgen. Da durch das System ein eigenständiger Produktionsplan erstellt wird, tritt es in Konkurrenz mit dem in Unternehmen etablierten System zur Produktionsplanung. Das System bietet weiterhin keine Möglichkeit zur Einbindung reaktiver Maßnahmen und berücksichtigt keine Anforderungen und Rahmenbedingungen energieflexibler Produktionssysteme.

SALAH & JAFARI (2016) formulierten ein Optimierungsproblem, mit dem sie unter Berücksichtigung des spezifischen Energiebedarfs und des spezifischen Energiepreises pro Zeitabschnitt die Rentabilität eines Produktionsplans maximieren. Mit den Nebenbedingungen berücksichtigen sie risikobezogene Parameter, unter anderem in Form eines Grads der Risikoaversion der Planer. Das vorgestellte Optimierungsproblem stellt einen alleinstehenden Ansatz für die Produktionsplanung dar, da dessen Übertragbarkeit in bestehende PPS-Systeme aufgrund der komplexen Nebenbedingungen als nicht gegeben angesehen wird.

Die Methodik zur energiebezugsorientierten Auftragsplanung von KELLER (2018) basiert auf einem sequenziellen Planungs- und Lösungsverfahren für die Reihenfolgeplanung und Maschinenbelegung unter Berücksichtigung von Energiekennzahlen. In der Arbeit werden Verknüpfungen zu bestehenden Systemen für die Erfassung von Betriebsdaten hergestellt, die entwickelte Methodik an sich baut jedoch nicht auf bestehende PPS-Systeme auf, sondern stellt einen alleinstehenden Ansatz dar. Verschiedene Risikoarten der energieorientierten PPS werden im Rahmen der Arbeit differenziert und erläutert, gehen jedoch nicht in die Entwicklung der Methodik ein.

3.1.3 Fazit

Aus der Untersuchung der bisherigen Forschungsergebnisse lässt sich folgern, dass die bisherigen Arbeiten zum Umgang mit Störungen im Umfeld der PPS lediglich reaktive Maßnahmen situativ und unmittelbar vor oder nach dem Eintreten eines unerwarteten Ereignisses vorschlagen, wohingegen die Ansätze des Risikomanagements weitestgehend auf präventive Maßnahmen zugreifen, ohne mögliche Reaktivmaßnahmen im Vorfeld bereitzustellen. Ansätze des Störungsmanagements aus dem Umfeld der energieorientierten Produktionssteuerung betrachten neben den durch Produktionsstationen induzierten Maßnahmen auch Energiespeicher als Lastmanagementoption, jedoch befindet sich die zeitliche Einordnung der Eingriffe hier ebenfalls vorrangig in einem situativen Kontext. Ansätze zur Integration von Präventivmaßnahmen durch Energiespeichersysteme im Rahmen des Risikomanagements im Umfeld der energieorientierten PPS sind nicht bekannt.

Sowohl die Ansätze zum Management von Störungen wie auch die Risikomanagementansätze sind meist als alleinstehende Verfahren zur Produktionsplanung bzw. -steuerung ausgelegt, die bestehende Lösungen in Unternehmen vorrangig ablösen würden und nur bedingt ergänzend eingesetzt werden können. Arbeiten an der Schnittstelle zwischen Produktionsplanung und Produktionssteuerung, die ein Risikomanagementsystem als Ergänzung zu bestehenden Systemen der PPS bieten, sind nicht bekannt. Eine Vielzahl der Arbeiten fokussiert lediglich logistische Zielgrößen im Risikomanagementprozess.

3.2 Ansätze zur Beurteilung von Risiken in der Produktion

3.2.1 Identifikation und Bewertung von Einzelementen

STEINMETZ (2007) entwickelte vorwiegend manuelle Methoden zur Risikoidentifikation und -bewertung für die Produktion, die auf der Strukturierung und Analyse von Einflussfaktoren auf die Produktion basieren. Auch WEIG (2008) setzte im Umfeld des Risikomanagements für Fabrikplanungsprojekte bei der Identifikation von Risiken auf etablierte Verfahren wie Risikochecklisten und Expertenworkshops mit anschließender Bewertung durch eine Risikomatrix. Für das strategische Risikomanagement im Maschinen- und Anlagenbau zeigte HEIN (2007) ein Vorgehen zur Durchführung einer Risikoinventur auf, bei dem Risiken zunächst unter der Anleitung von Führungskräften identifiziert und anschließend mittels der Eliminierung von Mehrfachnennungen, Einordnung von Ursache-Wirkungszusammenhängen sowie weiteren manuellen Schritten nachbereitet werden.

KÖNIG (2008) stellte eine Methodik zum Management betrieblicher Risiken bei produzierenden Unternehmen vor, mit der Risiken identifiziert und mittels eines Simulationsmodells anhand ihrer Auswirkungen auf Prozesselemente bewertet werden können. Durch eine Kategorisierung von Risiken und Maßnahmen wird deren Zuordnung zueinander ermöglicht. Auch der Ansatz von SCHMITT & ZENTIS (2011) basiert auf einer Modellierung des betrachteten Systems und seiner Zustände, einem objektorientierten Risikomodell sowie einem sogenannten Funktion-Effekt-Modell. Im Ergebnis kann ein Risikoinventar aufgestellt werden. Der Aufwand für die Datenbereitstellung zur Modellierung ist durch die Einbindung von Experten unterschiedlicher Bereiche als hoch einzuschätzen.

SOUSA ET AL. (2015) trugen einen Ansatz zur Identifikation von Risiken in industriellen Prozessen bei, der im Wesentlichen auf einer FMEA basiert. Auf die Erhebung von Einflussfaktoren und der auf historischen Daten basierenden Zuordnung einer Wahrscheinlichkeitsverteilung folgt eine Szenarioanalyse zur Ermittlung der Auswirkungen jedes Einflussfaktors.

WONSAK (2022) übertrug die Anwendung von Stresstests aus der Finanzindustrie auf Produktionssysteme, um eine systematische Risikoevaluation von Auswirkungen durch Umfeldveränderungen durchzuführen. Die sieben Phasen des Vorgehensmodells umfassen die Identifikation kritischer Prozesse, die Szenarioanalyse und die Entwicklung von Belastungsszenarien, die Wirkungsanalyse, die Maßnahmenauswahl zur Risikominimierung sowie die quantitative Bewertung und Ergebnisauswertung. Dieser sowie die zuvor aufgeführten

Ansätze weisen die Gemeinsamkeit auf, dass ausschließlich logistische Kenngrößen untersucht werden. Die spezifischen Eigenschaften und Einflussfaktoren energieflexibler Produktionssysteme finden keine explizite Berücksichtigung.

SIMON ET AL. (2018) identifizierten diese Forschungslücke und beschrieben einen Ansatz zur Risikobewertung von Energieflexibilitätsmaßnahmen. Zunächst wurden zwei Wirkungsrichtungen definiert. Zum einen hat die Durchführung von Energieflexibilitätsmaßnahmen einen Einfluss auf die Risikosituation in einem Produktionssystem. Weiterhin existieren im Produktionssystem Risiken, welche sich wiederum auf die Energieflexibilität und deren Verfügbarkeit auswirken. Für die Betrachtung der ersten Wirkrichtung werden nach diesem Ansatz die Kenntnis zu bestehenden Produktionsrisiken im Unternehmen vorausgesetzt. Es werden gängige Ansätze zur Identifikation von Risiken vorgeschlagen wie Kreativmethoden, Workshops, Prozessmodelle und Fehlerbaumanalysen sowie Experteneinschätzungen, Analysen des Maschinenbetriebs und Laborexperimente zur Abschätzung von Eintrittswahrscheinlichkeiten und Auswirkungen. Nach der Identifikation und Bewertung genereller Produktionsrisiken werden die Einflussfaktoren von Energieflexibilitätsmaßnahmen zu den vorangegangenen Schritten hinzugefügt. Für die Bewertung von Energieflexibilitätsmaßnahmen unter Risiken werden mittels Formeln deren Verfügbarkeit, zeitliche Faktoren wie Aktivierungszeit und Haltedauer sowie Kostenaspekte ermittelt.

ABELE ET AL. (2020) simulierten und bewerteten Unsicherheiten als stochastische Ereignisse in energieflexiblen Produktionssystemen am Beispiel der Papierindustrie. Ein energieoptimaler Produktionsplan wurde unter Verwendung von historischen Energiebedarfsdaten und Strompreisprognosen mittels einer mathematischen Optimierung für eine Halbstofffertigungsanlage generiert. Daneben ermittelte eine Simulation den jeweiligen Füllstand des Halbstoffspeichers und rechnete dabei aus historischen Daten ermittelte Unsicherheiten ein, um die Über- oder Unterschreitung kritischer Füllstandsgrenzen zu errechnen und diesen gegebenenfalls mittels regelbasierter Gegenmaßnahmen entgegenzuwirken. Die Analyse der Simulationsergebnisse über einen längeren Zeitraum bildete die Grundlage für die Ermittlung der Verfügbarkeit von Energieflexibilitätsmaßnahmen und deren Profitabilität für Investitionsentscheidungen unter Berücksichtigung produktionsbedingter Risiken.

UNTERBERGER (2020) stellte bei der Gestaltung energieflexibler Produktionssysteme fest, dass die im Planungsprozess zu berücksichtigenden Ereignisse sich in ihrem Eintreten nicht ausschließlich deterministisch verhalten und unterscheidet daher die Ereignismerkmale sicher, stochastisch und unsicher. Für das Umfeld der strategischen Planung erstellte er basierend auf den Entscheidungsfeldern von MIRSCHEL (2007) eine Klassifikation für aggregierte Aussagen zu den Zuständen und dem dynamischem Verhalten, um so den Energieflexibilitätsbedarf eines Produktionssystems unter Unsicherheit zu ermitteln.

3.2.2 Berücksichtigung von Wechselwirkungen zwischen Risiken und Maßnahmen

Die Erfahrung aus der Zusammenarbeit mit Unternehmen zeigt, dass die Beachtung von Wechselwirkungen zwischen einzelnen Risiken vergleichsweise unterrepräsentiert ist. Diese

Wahrnehmung bestätigt eine Umfrage bei mittelgroßen und großen Schweizer Unternehmen von 2016. Demnach bezieht die Hälfte der Unternehmen Wechselwirkungen von Risiken gar nicht oder nur teilweise in die Risikobeurteilung ein. Die Vernachlässigung der Wechselwirkungen wird durch die Autoren der Studie als kritisch für das Risikomanagement der Unternehmen eingestuft, da sich einzelne kleinere Risiken in Kombination als erfolgskritisch erweisen können. Als Grund für das Unterbleiben der Analyse werden fehlende Daten oder fehlendes Methodenwissen vermutet. (HUNZIKER & BALMER 2018)

Auch in wissenschaftlichen Veröffentlichungen zu Risikobeurteilungsansätzen ist der Umgang mit Wechselwirkungen unterschiedlich stark berücksichtigt. Verschiedene Ansätze, beispielsweise von STEINMETZ (2007) und ABELE ET AL. (2020), betrachten Risiken isoliert als Einzelelemente und berücksichtigen keine Wechselwirkungen untereinander.

KÖNIG (2008) stellte fest, dass zwischen Produktionsrisiken Interaktionen bestehen und sich diese gegenseitig beeinflussen oder auslösen können. Er bezeichnete die Betrachtung der Interaktionen als zentrales Element des Risikomanagementansatzes. Zur Umsetzung stellte er eine Interaktionsmatrix auf, in der alle identifizierten Risiken kategorisiert aufgeführt werden. Mittels der Matrix können die Experten jedem Risikopaar eine wahrscheinliche Beziehung mit starker oder schwacher Bindung zuweisen. Aus der Matrix lassen sich anschließend auch Verkettungen zwischen mehreren Risiken manuell herauslesen, die als verknüpfte Risiken darauf aufbauend oder ergänzend mit einem Ursache-Wirkungs-Diagramm dargestellt und vertieft untersucht werden können. Im letzten Schritt der Risikoidentifikation werden die Einzelrisiken anhand der Wechselwirkungen zu Risikoszenarien zusammengefasst, deren Auswirkungen unter Berücksichtigung von Interaktionen nochmals für das gesamte Szenario bewertet werden. Die Aussagen zu den Wechselwirkungen sind durch ihre Entstehung mittels einer Interaktionsmatrix mit zwei Merkmalen qualitativ beschrieben. QAZI & AKHTAR (2020) adaptierten den Ansatz der konventionellen Risikomatrix und erweiterten ihn um die Modellierung von Risikointerdependenzen, indem sie sogenannte Utility Indifference Curves zum Risiko-Nutzen-Verhältnis von risikoaversen, risikoaffinen und neutralen Entscheidern einführten.

Der Ansatz von KLÖBER-KOCH ET AL. (2018) weist ebenfalls auf die Bedeutung von Wechselwirkungen hin und führte die von KÖNIG (2008) vorgestellte Interaktionsmatrix zur Darstellung von Wechselwirkungen auch für den spezifischen Bereich der operativen Risiken in der PPS auf. Dabei werden mögliche Wechselwirkungen bereits bei der Identifikation von Einzelrisiken in einem Formblatt neben Risikoträgern, Risikofaktoren und weiteren Ausprägungen festgehalten. Im weiteren Verlauf wird die Risikolage eines Unternehmens anhand der Wahrscheinlichkeitsverteilung von Risikofaktoren, deren Wirkung sowie den Wechselwirkungen zueinander mittels einer Monte-Carlo-Simulation bestimmt. Diese eignet sich, um eine Vielzahl möglicher Ausprägungen und Kombinationen zu simulieren und so eine Wahrscheinlichkeitsdichte zu einem Risikoträger in Form einer Funktion aufzustellen. Die Monte-Carlo-Simulation bietet einen generellen und weit verbreiteten Ansatz zur Untersuchung von Kombinationseffekten von Einzelrisiken und wird praxisorientiert für die Anwendung zur Risikoaggregation von GLEIBNER & WOLFRUM (2019) beschrieben. Die Monte-Carlo-Simulation findet sich beispielsweise auch bei KREBS (2012), der mit diesem

Ansatz bei der strategischen Wahl von vernetzten Produktionsstandorten Einzelrisiken zu einem Gesamtrisiko aggregierte.

Die Betrachtung von Wechselwirkungen zeigt sich im industriellen Bereich häufig bei der Untersuchung von Wertschöpfungsnetzwerken am stärksten ausgeprägt. MERZ (2011) entwickelte einen integrierten Ansatz für die Bewertung von Risiken in der industriellen Produktion, der explizit verschiedene Fachbereiche einbezieht und die bis dahin defizitäre Betrachtung von Wechselwirkungen von Risiken in den Vordergrund stellt. Der Ansatz arbeitet mit einem hierarchischen Indikatormodell, das in der ersten Stufe die Vulnerabilität von Industriesektoren bestimmt. Daraufhin werden in Stufe zwei die so ermittelten sektorspezifischen Vulnerabilitätswerte anhand der räumlichen Verteilung der Industrie zu betrachteten Regionen zugeordnet. Die Abbildung von Wechselwirkungen erfolgt durch Kennzahlen im Parametermodell, die durch Experteneinschätzungen hinsichtlich der Ausprägung der gegenseitigen Beeinflussung parametrisiert werden können. Die Ergebnisse des Indikatorenmodells werden danach durch die Erfassung von unvollständig erfassten Wechselwirkungen und kausalen Abhängigkeiten mittels der Decision-Making Trial and Evaluation Laboratory (DEMATEL) Methode verbessert. Dieser ermöglicht die Analyse von Ursache-Wirkungsbeziehungen zwischen verschiedenen Variablen. Daneben wurden Ansätze der Fuzzy-Logik eingebracht und weiterentwickelt, welche ungenaue Aussagen in komplexen Themengebieten bündelt und so Wertemengen zu funktionellen Kriterien ableitet (ZADEH 2008).

PFOHL ET AL. (2011) und SHAKYA & CHAUHAN (2019) modellierten Risikointerdependenzen in Supply-Chains bzw. Produktionssystemen mittels Interpretive Structural Modelling (ISM). ISM ist ein Prozess mit festgelegten Schritten, der komplexe Beziehungen von Elementen in einer binären Matrix und der grafischen Repräsentation der Beziehungen in einem gerichteten Netzwerk abbildet (MALONE 1975). Zunächst sind alle relevanten Elemente des betrachteten Systems aufzulisten. Mit verhältnismäßig geringem Aufwand und ohne tiefere Kenntnisse der ISM-Operationen, können Experten im paarweisen Vergleich die Abhängigkeiten (unidirektional, bidirektional, keine Beziehung) zwischen Elementen in eine Matrix eintragen. Die so entstandene Structural Self Interaction Matrix (SSIM) wird mittels Transformationsvorschriften in eine Initial Reachability Matrix (IRM) umgewandelt, die die Beeinflussung der Elemente in binärer Form darstellt. Mit der Elimination von Kettenschlüssen entsteht die Final Reachability Matrix (FRM). Werden alle binären Faktoren für die Zeilen der FRM summiert, lässt sich die sogenannte Triebkraft der betrachteten Elemente berechnen. Die Summe der Spalten ergibt wiederum den Grad der Abhängigkeit der Elemente. Mit der Partizionierung der IRM wird für jedes Element betrachtet, wie viele Elemente vorausgehen und wie viele Elemente von diesem Element erreicht werden können. Durch die Angabe der paarweisen Verbindungen liegen alle Informationen zur Ableitung gerichteter Graphen vor. (PFOHL ET AL. 2011, SHAKYA & CHAUHAN 2019) Die bisher vorgestellten Ansätze stellen zwar Abhängigkeiten dar, aber sie ermöglichen keine Betrachtung der Eintrittswahrscheinlichkeit, und keine Integration des Ausmaßes von Risiken ist möglich.

Zur Ergänzung bedingter Eintrittswahrscheinlichkeiten kombinierten WU ET AL. (2015) die ISM mit dem Ansatz der bayesschen Netze. Zunächst werden die Beziehungen der identifizierten Risiken ermittelt und als gerichteter Graph dargestellt, um anschließend mittels

bayesschen Netzen die bedingten Wahrscheinlichkeiten zum Eintreten der einzelnen Risiken in Abhängigkeit von vorausgehenden Risiken zu ermitteln. Bayessche Netze basieren auf azyklische Graphen aus Knoten und gerichteten Pfeilverbindern mit Angabe von deren Abhängigkeiten, welche beispielsweise durch ein vorausgehendes ISM erstellt wurden. Für jeden Knoten ist eine bedingte Wahrscheinlichkeitsverteilung in Form von Tabellen gegeben. Für die Eintrittswahrscheinlichkeit eines gesamten Pfades werden die bedingten Wahrscheinlichkeiten der einzelnen Elemente entlang des Pfadverlaufs multipliziert. Abbildung 10 zeigt ein System mit fünf Elementen und drei exemplarischen Pfaden. HEINECKE (2013) nutzte bayessche Netze, um die Ankunftswahrscheinlichkeit von Zulieferteilen in einem Wertschöpfungsnetzwerk am Beispiel der Automobilindustrie zu ermitteln. MAURER (2016) setzte bayessche Netze ein, um in einem Wertschöpfungsnetzwerk die bedingte Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten von Störungen zu ermitteln. DAULTANI ET AL. (2019) entwickelten ein Vorgehen zur Ermittlung der bedingten Wahrscheinlichkeiten von Risiken und wendeten es auf die interne Wertschöpfungskette eines Automobilhersteller an. PEREIRA ET AL. (2016) nutzten bayessche Netze, um Risiken beim Montageprozess von Turbinen hinsichtlich ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit zu bewerten.

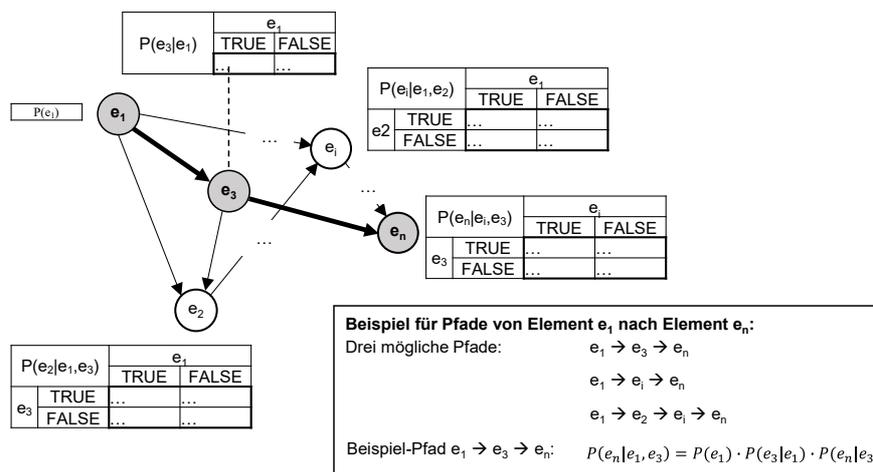


Abbildung 10: Beispielhaftes bayessches Netz (angelehnt an ROTH ET AL. 2021)

Bayessche Netze werden in der Literatur häufig mit der Methode der Copulas verknüpft. Damit können Verteilungsfunktionen aufgestellt werden, die korrelierende Risiken koppeln. So kann die Wahrscheinlichkeit angegeben werden, zu der ein Risiko 1 einen festgelegten maximalen Schaden erreicht und gleichzeitig bei Risiko 2 ebenfalls der festgelegte Maximalschaden eintritt. Die Methode ermöglicht die Verarbeitung eines hohen Informationsgehalts, bringt jedoch als Nachteile einen hohen Rechenaufwand und Aufwand für die Parametrisierung durch Experten mit sich. Dadurch findet sich deren Anwendung vorrangig für langfristige Betrachtungszeiträume wieder, beispielsweise in einer Studie zu Risiken durch Fluten für eine Region (FAN ET AL. 2020) oder der Modellierung von Risiken eines Untertunnels (PAN ET AL. 2019).

3.2.3 Fazit

Die Analyse bestehender Ansätze zur Beurteilung von Risiken im Produktionsumfeld zeigte, dass die Identifikation und Bewertung der Risiken als primärer Schritt des Risikomanagementprozesses hinsichtlich der Auswirkungen auf logistische Zielgrößen bereits umfassend beleuchtet wurde. SIMON (2020) erweiterte mit einem spezifischen Ansatz zur risikoorientierten Bewertung der Energieflexibilität den Stand des Wissens um die Anforderungen und Randbedingungen des energieflexiblen Fabrikbetriebs und integrierte die Auswirkungen auf energetische Kenngrößen. Die Verfahren sind häufig manuell und mit hohem Aufwand durchzuführen, da sie sich die mittel- bis langfristige Entscheidungsunterstützung zum Ziel setzen. Kurzfristige Planungsaufgaben für den zeitlichen Ablauf der operativen PPS und die Möglichkeit einer Automatisierung von Teilen der Abläufe sind nicht Gegenstand der Arbeiten. Die Übertragung auf den Kontext der energieorientierten PPS erfordert weiterhin die direkte Verknüpfung der Risiken mit möglichen Folgerisiken und die Zuordnung geeigneter Maßnahmen. Wechselwirkungen zwischen Risiken und die Effekte von Maßnahmen anhand spezifischer Kennzahlen energieflexibler Produktionssysteme sind noch nicht Gegenstand der Arbeiten. Zusammenfassend ist festzuhalten, dass ein Vorgehen für die Risikobeurteilung für die Anwendung durch Produktionsplaner und -steuerer in energieflexiblen Produktionssystemen bisher nicht in der Literatur verfügbar ist.

3.3 Ansätze zur Risikobehandlung in der PPS

3.3.1 Auswahl von Maßnahmen für die PPS

Mehrere der im Vorfeld vorgestellten Ansätze beschränken sich auf die Beurteilung von Risiken oder gehen auf die Behandlung nur am Rande ein. So stellt der Ansatz von SIMON (2020) als Ergebnis technisch und wirtschaftlich bewertete Energieflexibilitätsmaßnahmen bereit. ABELE ET AL. (2020) verweisen auf regelbasiert eingeleitete Maßnahmen, ohne diese genauer zu erläutern.

STEINMETZ (2007) unterschied die wirkungsbezogene und ursachenbezogene Risikobehandlung, angelehnt an BRÜHWILER (1980). Erstere setzt an den Auswirkungen an und versucht negative Abweichungen vom Zielwert zu begrenzen. Die ursachenbezogene Risikobehandlung begrenzt die Ereignishäufigkeit und setzt damit an der Eintrittswahrscheinlichkeit an. Die Ableitung und Auswahl von Maßnahmen erfolgt im Anschluss manuell durch ein strukturiertes Vorgehen. KÖNIG (2008) bewertete Maßnahmen nach deren Einsatzgeschwindigkeit, Einsatzdauer und Schadensminderungspotenzial. Die Auswahl der Maßnahmen erfolgt anhand der Gegenüberstellung des durch die Maßnahme erzielbaren Gewinns mit dem Aufwand zur Durchführung der Maßnahme in Form von Risikomanagementkosten.

Entscheidend für die Auswahl von Maßnahmen in der Produktionsplanung ist beim Ansatz von KLÖBER-KOCH (2021) die Risikopräferenz des Entscheiders. Er lehnte an die DIN EN ISO 13849-1 fünf Risikopräferenzklassen von sehr risikoavers über neutral bis sehr risikoaffin an und ermittelte diese im Rahmen des Vorgehens mit einer Kombination aus Risk Ruler und Hault-Laury-Lottery (HLL). Risk Ruler ist ein einfaches subjektives Verfahren

zur Risikopräferenzermittlung, bei dem der Proband einen definierten Fragenkatalog ausfüllt. Dieser wurde für die Anforderungen der Produktionsplanung angepasst. Bei der HLL entscheiden die Probanden zehnmal zwischen zwei Optionen mit jeweils geringem und hohem Risiko, wobei sich im Verlauf der Auswahl das Verhältnis verändert. Die Anzahl der Auswahlmöglichkeiten, nach der sich der Proband für die risikoreichere Alternative entscheidet, bestimmt seine Risikofreudigkeit. (HOLT & LAURY 2002) Die so ermittelte Risikopräferenz des Produktionsplaners wird bei der Erstellung des Produktionsplans in Form einer stochastischen Problemformulierung für das Optimierungsproblem berücksichtigt. Die Arbeit konzentriert sich dabei ausschließlich auf logistische Ziele, es erfolgt keine Berücksichtigung von energetischen Ziel- und Einflussgrößen in Form eines multikriteriellen Ansatzes. Weiterhin ist die ermittelte Risikopräferenz durch das gewählte Vorgehen stark auf die Personen im Allgemeinen bezogen und weniger auf die bevorstehende Auftragsituation und auf den konkret zu erwartenden Zustand des Produktionssystems.

Fortgeschrittene Ansätze zur Berücksichtigung mehrerer, teils in Konflikt stehenden Kriterien fallen häufig in den Bereich des Multi Criteria Decision Makings (MCDM), bei der eine geeignete Option bei komplexen, mehrdimensionalen Entscheidungsproblemen gewählt werden soll. Dazu werden im Allgemeinen zunächst die relevanten Kriterien erhoben und gewichtet. Im Anschluss werden die Optionen anhand der Kriterien priorisiert. (ZAVADSKAS ET AL. 2014)

In der Literatur finden sich Arbeiten, die neue MCDM Methoden vorstellen und beschreiben, beispielsweise SAATY (1990), ISHIZAKA & NEMERY (2013) und ALINEZHAD & KHALILI (2019). Ein weiteres Feld an Beiträgen stellt vergleichende Arbeiten dar, welche die bekannten MCDM-Ansätze analysieren und einordnen, wie VUJICIC ET AL. (2017), WANG ET AL. (2010b), und ZANAKIS ET AL. (1998). Die dritte Kategorie von Arbeiten wendet MCDM-Ansätze auf reale Entscheidungsprobleme an. Einen Überblick über die Arbeiten der drei Kategorien bieten BHOLE (2018) sowie ZAVADSKAS ET AL. (2014). Relevant für diese Arbeit sind durch den Bezug zum Umgang mit Störungen insbesondere jene Ansätze aus dem Umfeld der Planung von Instandhaltungsstrategien, die meist mehrere MCDM-Ansätze für die spezifische Problemstellung auswählen, kombinieren und adaptieren. ŞAHIN (2020) verglich die Ergebnisse von 42 Studien zu Entscheidungsproblemen, die durch die Kombination verschiedener MCDM und Gewichtungsansätze entstanden. Er folgerte, dass die Nachteile einzelner Methoden durch die Kombination mit anderen Ansätzen ausgeglichen werden können.

ARUNRAJ & MAITI (2010) wählten die passende Wartungsstrategie anhand der Wartungskosten und dem Maschinenausfallrisiko. Zur Gewichtung der konkurrierenden Kriterien setzten sie Analytic Hierarchy Process (AHP) ein. AHP basiert in seiner Grundform auf den Arbeiten von Saaty (SAATY 1984, 1990) und baut auf dem paarweisen Vergleich von Alternativen durch Experten. Anhand einer Skala von neun Schritten wird entschieden, wie bedeutend ein Kriterium gegenüber einem anderen zur Zielerreichung ausgeprägt eingeschätzt wird. Dabei ist eine hierarchische Strukturierung von Kriterien mit der Einordnung von Unterkriterien in übergeordnete Kategorien möglich.

SEITI ET AL. (2019) optimierten Wartungsintervalle für den Wechsel von Ersatzteilen in der präventiven Instandhaltung in einem Stahlwerk. Die Gewichtung der Kriterien erfolgte durch Experteneingaben. Durch die Kombination mit der Fuzzy-Mengen-Theorie werden ungenaue Entscheidungen kompensiert. PEREIRA ET AL. (2016) setzten ebenfalls AHP ein und sortieren damit den relativen Einfluss von Risikoauswirkungen bei der Turbinenmontage. MUQIMUDDIN & SINGGIH (2020) verwendeten AHP für die Gewichtung von Risikoprioritätszahlen zu Störungen in Produktionsprozessen. ILANGKUMARAN & KUMANAN (2009) fragten Experteneinschätzungen für Wartungsstrategien in der Textilindustrie ab und gewichteten sie mithilfe der AHP in Kombination mit Fuzzy-Mengen.

Um die Nachteile subjektiver Experteneinschätzungen durch die AHP zu kompensieren, nutzten unter anderem FEIZI ET AL. (2017) und YILMAZ & HARMANCIOGLU (2010) ergänzend die Entropie nach SHANNON (1972) bei der Auswahl eines geeigneten Bergbaustandorts bzw. Bewässerungssystems. Mit der Entropie ist es möglich, die Gewichtung einzelner Kriterien anhand des Informationsgehalts und der Unsicherheit der jeweiligen Ausprägungen der Alternativen zu berechnen. Kriterien, die für einen Großteil der Alternativen ähnliche Bewertungen haben, weisen eine niedrige Entropie auf, da die darin enthaltene Streuung der Daten gering ist. Die Unsicherheit ist niedrig, da mit einer hohen Wahrscheinlichkeit der eintretende Wert vorhergesagt werden kann. Im Entscheidungsproblem sollte dieses Kriterium eine hohe Gewichtung aufweisen.

Für die auf die Gewichtung von Kriterien folgende Priorisierung der Alternativen bieten sich ebenfalls mehrere Ansätze an, die fallspezifisch auszuwählen und gegebenenfalls anzupassen sind. ARUNRAJ & MAITI (2010) verwendeten Compromise Programming (CP) zur Priorisierung im Anschluss an die Gewichtung mittels AHP. CP priorisiert die Alternativen anhand deren Entfernung zu einer idealen Lösung. MUQIMUDDIN & SINGGIH (2020), ILANGKUMARAN & KUMANAN (2009) setzten Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) ein, bei der nicht nur die kürzeste Entfernung jeder Alternative zur idealen Lösung ausschlaggebend ist, sondern auch die längste Entfernung zur anti-idealen Lösung. Ein gewichteter Wert dieser beiden Ausprägungen wird für die Priorisierung herangezogen. YILMAZ & HARMANCIOGLU (2010) erprobten neben TOPSIS und CP auch Simple Additive Weighting (SAW). Bei SAW werden die Ausprägungen für jedes Kriterium auf eine Skala von 0 bis 1 normalisiert und für die Priorisierung mit dem Wert der maximalen Ausprägung unter allen Kriterien verglichen. Sie erhalten für alle drei Ansätze die gleiche Priorisierung und folgern, dass der vorangehenden Gewichtung der Kriterien eine zentrale Bedeutung zukommt. DOCZY & ABDELRAZIG (2017) kombinierten AHP zur Gewichtung von Projektzielen bei Bauprojekten mit der Multi Attribute Utility Theory (MAUT), um anschließend Entscheidungsalternativen zu Priorisieren.

3.3.2 Integration von Maßnahmen im Rahmen der PPS

Maßgeblich für den Energieverbrauch eines Produktionssystems ist der Einsatz der Produktionsstationen. Die zeitliche Einordnung der Aufträge mit Zuordnung zu den Produktionsstationen erwirkt den elektrischen Lastgang der Fabrik, der wie in Abschnitt 2.2.3 dargelegt, sich wesentlich auf die Energiebeschaffungskosten auswirkt. Dementsprechend eignet sich

die Belegungsplanung als Rahmen für die Behandlung von Maßnahmen innerhalb des Einflussfelds der PPS. (ROTH & REINHART 2019) Der Vorgang der Zuordnung von Aufträgen zu Produktionsstationen und Zeitpunkten wird in der englischsprachigen Literatur als Scheduling bezeichnet. Ein Rescheduling ist dementsprechend eine kurzfristige Anpassung des Plans, ausgelöst durch unerwartete Ereignisse oder innerhalb eines periodisch festgelegten wiederkehrenden Zeitraums. Methodisch stehen das einfache Verschieben der Aufträge, ein partielles Rescheduling der Aufträge und eine komplette Neuplanung zur Verfügung. Diese sogenannte prädiktiv-reaktive Strategie kann durch ein robustes Scheduling ergänzt werden, welches bereits beim originären Scheduling die Möglichkeit unerwarteter Ereignisse berücksichtigt und Flexibilität zur Reaktion bietet. (VIEIRA ET AL. 2003) Übertragen auf das Risikomanagement kann das prädiktiv-reaktive Rescheduling als Einsatz von Reaktivmaßnahmen und die robuste Planung eines originären Plans als Einsatz von Präventivmaßnahme verstanden werden.

Die Vielzahl an verfügbaren Verfahren für das Scheduling und Rescheduling lassen sich übergeordnet kategorisieren in optimierungsbasierte und konventionelle Verfahren sowie Verfahren der künstlichen Intelligenz (KI). Optimierungsbasierte Verfahren greifen auf mathematische Ansätze zurück wie lineare Programmierung und Branch-and-Bound Verfahren. Konventionelle Verfahren nutzen Prioritätsregeln wie First-in-First-Out (FIFO) oder Kürzeste Operationszeit (KOZ) sowie konventionelle Heuristiken. Agentensysteme und neuronale Netze sind Beispiele für KI-basierte Ansätze. Eine umfassende Übersicht der Kategorien und weiterführende Erläuterungen der Methoden findet sich beispielsweise in EVERS (2002) und PINEDO (2016).

Die Methode von KLÖBER-KOCH (2021) errechnet einen Produktionsplan mittels einer stochastischen Problemformulierung, um Zufallsparameter zu berücksichtigen, die zum Zeitpunkt der Entscheidung noch nicht bekannt sind. Als Ansatz zur Überführung des stochastischen in ein deterministisches Problem wurde die Regressmodellierung gewählt. Die Zielfunktion der mathematischen Optimierung verfolgt die Minimierung der Gesamtkosten, bestehend aus der Summe der Fertigungs-, Bearbeitungs-, Rüst-, und Verspätungskosten. Dem Bearbeitungszeitanteil einer Maschine wird entsprechend der vorangegangenen Parametrisierung der Risikoträger zur Abbildung der Risikopräferenz der Entscheider ein risikospezifischer Anteil hinzuaddiert. Damit entspricht der Ansatz einer robusten Produktionsplanung nach VIEIRA ET AL. (2003) und somit der Nutzung präventiver Maßnahmen. Reaktive Maßnahmen sind durch das entwickelte Vorgehen nicht integrierbar. Die Ressource Energie wird im Scheduling nicht berücksichtigt.

TOBA (2000) entwickelte einen effizienten Ansatz für das reaktive Rescheduling, der die Rechenzeit durch das Zerlegen des Plans in einzelne Segmente verkürzt. FRANTZÉN ET AL. (2011) stellten einen Ansatz für das robuste Scheduling und Rescheduling mit Anwendung für eine komplexe Fertigungslinie bei einem Automobilhersteller vor. Eine simulationsbasierte Optimierung nutzt Echtzeitdaten der Fertigungslinie und gibt die Ergebnisse als Handlungsempfehlungen an die Fertigungssteuerer weiter.

SCHULTZ (2018) entwickelte im Rahmen der energieorientierten Produktionssteuerung drei Verfahren zur Vermeidung kritischer Lastgangabweichungen. Zunächst wurde eine energieorientierte Reihenfolgebildung für Aufträge durch die Ergänzung der Lastgangabweichung als Zielgröße neben der Termintreue entwickelt. Die Umsetzung basiert auf der Errechnung einer Prioritätskennzahl für Aufträge, die neben der in der Literatur bekannten verbleibenden Schlupfzeit (entspricht der verbleibenden Zeit bis zum Liefertermin eines Auftrags) eine erwartete Lastgangabweichung enthält. Die hybride energieorientierte Auftragsfreigabe stellt das zweite Verfahren dar. Durch sie wird der Zeitpunkt des tatsächlichen Produktionsstarts eines Auftrags dem derzeitigen tatsächlichen Lastgang angepasst. Das dritte Verfahren ist ein situatives Lastmanagement. Es ermöglicht die Änderung von Betriebszuständen der Betriebsmittel um Lastgangabweichungen entgegenzuwirken. Das Lastmanagement wirkt dabei im Gegensatz zu den vorangehenden Verfahren nicht indirekt über die Aufträge, sondern direkt auf die jeweilige Last durch Nutzung der kurzfristigen Kapazitätsflexibilität einer Anlage. Ein Algorithmus minimiert die Gesamtkosten mit der Summe aus den positiven und negativen Lastabweichungen, den Kosten für die gehandelte Energiemenge und den Maßnahmenkosten in einem Zeitintervall. Der Ansatz ist durch die Fokussierung auf die Produktionssteuerung als situativ einzuschätzen, d.h., es erfolgt kein zeitlicher Verlauf für Entscheidungen, welche Eintrittswahrscheinlichkeiten und Wechselwirkungen in Form eines Risikomanagements ermöglicht. Daher ist auch die Ableitung präventiver Maßnahmen nur begrenzt möglich.

RÖSCH (2021) trainierte Reinforcement Learning (RL)-Agenten anhand einer Simulationsumgebung des Produktionssystems. Die RL-Agenten generieren Erfahrungen durch Belohnungen für positive Auswirkungen auf Aktionen. Ein Speicheragent bestimmt den Lade- bzw. Entladestrom einer Batterie, der Marktagent führt Aktionen zum Handel von Energie aus und der Ressourcenagent beeinflusst die Abarbeitung der Warteschlange an Aufträgen an Produktionsstationen. Die Belohnungsfunktion ist kostenbasiert und besteht im Wesentlichen aus den Kategorien Energie- und Produktionskosten. Die Agenten sind nach dem Training in der Lage, ein Produktionssystem mit Produktionsstationen und Energiespeicher mit kurzen Reaktionszeiten zu steuern und dabei auf unerwartete Ereignisse wie z.B. Störungen einzugehen. Der Betrachtungshorizont der entwickelten Steuerung ist mit einem Tag sehr kurzfristig und daher nur für den unmittelbaren Einsatz in der Produktionssteuerung geeignet. Mittelfristige Entscheidungen, wie sie in der energieorientierten PPS beispielsweise durch die Auktionszeiträume des Day-Ahead Markts üblich sind, können nicht durch das Agentensystem unterstützt werden.

3.3.3 Fazit

Bisherige Forschungsarbeiten haben bereits vielfach die zentralen Fragestellungen multikriterieller Entscheidungsprobleme aufgegriffen und geeignete Lösungen zu deren Bearbeitung bereitgestellt. Die Untersuchung der Anwendung dieser Lösungen zeigt, dass für die spezifischen Problemstellungen jeweils geeignete Lösungsansätze auszuwählen und anzupassen sind. Häufig ist eine die Kombination mehrerer Ansätze erforderlich, um Schwächen einzelner Ansätze auszugleichen und so verwendbare Ergebnisse zu erzielen. Wie in Abschnitt 1.1

dargelegt, wird im Rahmen der energieorientierten PPS u.a. durch die zusätzliche Berücksichtigung der fluktuierenden Strompreise neben den bestehenden Randbedingungen von Produktionssystemen das ohnehin komplexe Aufgabenfeld der PPS um weitere Einflussfaktoren und Zielgrößen erweitert. Diese waren nicht Bestandteil bisheriger Arbeiten zur Auswahl von Maßnahmen. Die Risikopräferenz von Entscheidern wurde insbesondere von KLÖBER-KOCH (2021) ausführlich behandelt, bezieht sich aufgrund des gewählten Ansatzes jedoch stark auf die persönliche und grundlegende Einstellung der Entscheider. Eine kurzfristige Anpassung anhand der betrachteten Auftragslage ist nur bedingt umsetzbar.

Durch die vorab festgelegte Fokussierung der Ansätze auf die Produktionsplanung oder die Produktionssteuerung erfolgt die Umsetzung von Maßnahmen als präventive bzw. reaktive Strategie zur Behandlung von Risiken. Das breite Spektrum robuster Pläne mit integrierten präventiven Maßnahmen sowie Reaktionsplänen mit reaktiven Maßnahmen beim Eintreten von Ereignissen in Kombination wird daher nach dem aktuellen Stand der Forschung für die energieorientierte PPS nicht ausgereizt.

3.4 Ableitung des Handlungsbedarfs

Im Rahmen dieses Kapitels wurde der Stand der Forschung im Hinblick auf Risikomanagementansätze im Umfeld der Produktion umfassend untersucht. Der Fokus lag auf der generellen Einordnung der Methoden sowie den bestehenden Ansätzen zur Beurteilung und Behandlung von Risiken. Aus diesen Erkenntnissen lässt sich der im folgenden zusammengefasste Handlungsbedarf anhand dreier zentraler Aspekte ableiten.

1. **Risikomanagementansatz für energieflexible Produktionssysteme an der Schnittstelle zwischen operativer Produktionsplanung und -steuerung**

Die zunehmende Komplexität durch die energiebezogenen Kennzahlen in der PPS erfordert die Nutzung der Potenziale aller verfügbarer Maßnahmen. Das System sollte den Charakter einer Entscheidungsunterstützung zur Ergänzung bestehender Lösungen der Produktionsplaner und -steuerer haben und keinen Ersatz bereits etablierter Lösungen darstellen. Ein unterstützendes Lastmanagement durch Batteriespeicher ist in die Anforderungen und Zuständigkeiten der PPS zu integrieren, ohne vertieft in die Unternehmensbereiche des Last-, oder Energiemanagements einzugreifen.

2. **Bewertung von Risiken und Maßnahmen mittels eines automatisierbaren Ansatzes unter Berücksichtigung von Wechselwirkungen und der vorliegenden Auftragsituation anhand spezifischer Kennzahlen für energieflexible Produktionssysteme**

Risiken können weitere Folgerisiken nach sich ziehen, sodass auch scheinbar unkritische Risiken die Ziele der Produktion gefährden können. Es ist erforderlich, einen Ansatz zu entwickeln, mit dem Wechselwirkungen von Risiken hinsichtlich der Eintrittswahrscheinlichkeiten und Auswirkungen modelliert werden können. Dabei gilt es das Umfeld der PPS durch automatisierbare Konzepte zu unterstützen, um den Aufwand der Entscheider für die Bewertung zu reduzieren. In die Bewertung der

Wechselwirkungen müssen auch präventive und reaktive Maßnahmen aufgenommen werden, sodass Risikobehandlungsstrategien entstehen, die anhand geeigneter Bewertungskriterien eines energieflexiblen Produktionssystems priorisiert werden können.

3. Auswahl der Risikobehandlungsstrategie nach subjektiven und objektiven Einschätzungen und aufwandsarme Integration präventiver und reaktiver Maßnahmen

Die Behandlung von Risiken unterliegt häufig Zielkonflikten, beispielsweise zwischen der erwartbaren Risikoreduktion und den Kosten für die Maßnahmen. Die Auswahl der geeigneten Strategie ist daher über multikriterielle Verfahren durchzuführen, die sowohl die objektive als auch die subjektive Risikopräferenz der Entscheider berücksichtigen. Dabei sollte der Aufwand für die Entscheider begrenzt werden, um die Akzeptanz und Bereitschaft zur Nutzung des Systems zu steigern. Bei der Integration von Maßnahmen müssen sowohl präventive als auch reaktive Maßnahmen über eine automatisierbare Methode in den bestehenden Produktionsplan integriert werden können.

4 Risikomanagementsystem für die energieorientierte PPS

4.1 Definition der Anforderungen an das System

Im vorangegangenen Kapitel 3 wurde der derzeitige Stand der Forschung untersucht und der daraus resultierende Handlungsbedarf anhand der Defizite aktueller Ansätze in Abschnitt 3.4 zusammengefasst. Aus diesem Handlungsbedarf werden im Folgenden die Anforderungen an das Risikomanagementsystem abgeleitet. Wie in Tabelle 2 dargestellt, erfolgt eine Differenzierung in allgemeine und spezifische Anforderungen.

Tabelle 2: Allgemeine und spezifische Anforderungen an das System

Kategorie	Anforderung
Allgemein	Transparenz
	Übertragbarkeit und Skalierbarkeit
	Kosten-Nutzen-Verhältnis
Spezifisch	Integrierbarkeit in bestehende Systeme an der Schnittstelle zwischen Produktionsplanung und -steuerung
	Interaktionsfähigkeit mit Batteriespeichern
	Berücksichtigung von Wechselwirkungen und Auswirkungen auf logistische und energetische Zielgrößen
	Ermöglichung von präventiven und reaktiven Maßnahmen
	Automatisierbarkeit der Systemelemente

Zunächst werden die allgemeinen Anforderungen an das System näher erläutert, welche unabhängig von der speziellen Zielsetzung bei der Entwicklung eines Systems Gültigkeit besitzen sollten. Es folgen die spezifischen Anforderungen, die sich auf die konkrete Zielstellung des vorliegenden Systems beziehen und aus den Erfahrungen aus industriellen Anwendungsfällen sowie aus der untersuchten Literatur abgeleitet sind.

Allgemeine Anforderungen

Die nachfolgend definierten allgemeinen Anforderungen sind unabhängig von der spezifischen Zielstellung durch ein System zu erfüllen, um dessen Anwendbarkeit und Praxistauglichkeit im industriellen Umfeld zu gewährleisten. Vergleichbare allgemeine Anforderungen wurden u.a. von PIELMEIER (2019), angelehnt an LINDEMANN (2007), sowie SCHNELL (2020) und KLÖBER-KOCH (2021) aufgestellt. Die allgemeingültigen Anforderungen an Systeme

werden nachfolgend erläutert und in den Kontext energieflexibler Produktionssysteme eingeordnet.

- **Transparenz**

Transparenz bei den Bearbeitungsschritten, den eingesetzten Daten und den Ergebnissen der Systembausteine ist von entscheidender Bedeutung für die Akzeptanz und Praxistauglichkeit des Systems. Den Herausforderungen bestehender PPS-Systeme wie mangelndes Vertrauen in Handlungsempfehlungen oder ein unzureichender Funktionsumfang (LÖDDING ET AL. 2019) kann nur begegnet werden, wenn der Ablauf und Zusammenhang der methodischen Schritte ersichtlich ist. Eine hohe Nachvollziehbarkeit bei der Aufbereitung und Verarbeitung von Produktions- und Energiedaten ermöglicht die Plausibilisierung durch Experten und gewährleistet, dass die Ergebnisse des Systems übernommen und umgesetzt werden.

- **Übertragbarkeit und Skalierbarkeit**

Das System soll bei der grundlegenden Strukturierung, Modellierung und Konzeptionierung einen hohen Grad an Allgemeingültigkeit aufweisen. Im Hinblick auf die teils sehr heterogenen Prozesse der energieintensiven Industrie sowie einer großen Vielfalt an Herstellungsverfahren in nicht energieintensiven Produktionssystemen soll das System möglichst unabhängig von Branchen und Unternehmen ausgestaltet sein. Neben der Übertragbarkeit auf verschiedene Anwendungsfälle gilt es sicherzustellen, dass das Risikomanagementsystem an Veränderungen in Produktionssystemen angepasst werden kann und im Hinblick auf weitere Anlagen und Datenstrukturen skalierbar ist.

- **Kosten-Nutzen-Verhältnis**

Das Risikomanagement stellt im Umfeld der PPS eine Ergänzung zu den Kernprozessen dar, was zunächst zusätzlichen Aufwand bedeutet. Ein Nutzen entsteht mittel- bis langfristig, wenn durch das Risikomanagement im Fall unerwarteter Ereignisse bessere Handlungen erfolgen und so zusätzliche Kosten vermieden werden. In energieflexiblen Produktionssystemen können neben Vertragsstrafen für Terminverzögerungen auch Pönalen für Abweichungen vom beschafften Strom sowie erhöhte Netzentgelte durch Lastspitzen geeignete Ansatzpunkte für Kosteneinsparungen darstellen. Ein Risikomanagementsystem wird nur dann implementiert und dauerhaft betrieben, wenn sich die anfängliche Investition und die laufenden Kosten für den Betrieb durch diese Kosteneinsparungen über einen akzeptablen Zeitraum amortisieren.

Spezifische Anforderungen

Neben den allgemeinen Anforderungen bestehen spezifische Anforderungen an das System, die aus den Erkenntnissen des Stands der Technik hervorgehen und sich aus dem erarbeiteten Handlungsbedarf ableiten. Die Ausgestaltung der spezifischen Anforderungen wurde weiterhin durch Erfahrungen und Beobachtungen aus der Projektarbeit im Umfeld von energieflexiblen Produktionssystemen ergänzt.

- **Integrierbarkeit in bestehende Systeme**

PPS-Systeme (sowohl die Vorgehensweise als auch die unterstützenden Softwarelösungen) sind in den meisten Unternehmen fest verankert. Eine lange Nutzungsdauer der Systeme von 10 Jahren, teilweise aber auch mehr als 20 Jahren, stellt keine Seltenheit dar. Ein Wechsel der Systeme ist mit hohem Aufwand und hohen Risiken verbunden. (SCHÖNSLEBEN 2020, S. 382) Das Risikomanagementsystem soll daher keine bestehenden Systeme ablösen, sondern vielmehr als gut integrierbare Ergänzung zu bestehenden Systemen verstanden werden. Dabei gilt es sicherzustellen, dass möglichst viele bereits vorhandene Auftrags-, Maschinen- und Energiedaten in das Risikomanagementsystem eingehen können und dass die Ausgabe der Ergebnisse des Risikomanagementsystems wiederum kompatibel mit nachfolgenden Systemlösungen ist.
- **Interaktionsfähigkeit mit Batteriespeichern**

Speichersysteme stellen eine wesentliche Flexibilitätsmaßnahme nach VDI 5207-1 (2020) dar. Sie ergänzen den Handlungsspielraum der PPS bei der Anpassung von Lasten ohne Auswirkungen auf den Materialfluss (ROTH & REINHART 2019). Werden geeignete Betriebsstrategien verfolgt, können sie sowohl präventiv durch das Vorhalten eines bestimmten Ladezustands als auch reaktiv durch situative Lade- oder Entladevorgänge eingesetzt werden. Aus Sicht der PPS sind Wechselwirkungen zwischen der Last von Produktionsanlagen und dem Batteriespeicher zu beachten und integriert zu planen, ohne zu tief in den Verantwortungsbereich des Energiemanagements und der Energiebeschaffung mit den weiterführenden Einsatzstrategien von Batteriespeichern einzugreifen.
- **Berücksichtigung von Wechselwirkungen und Auswirkungen auf logistische und energetische Zielgrößen**

Risiken in Produktionssystemen stehen nicht für sich allein, sondern können Folgerisiken nach sich ziehen, sodass auch scheinbar unkritische Risiken kumuliert schwerwiegende Auswirkungen auf Produktionsziele haben können. Genauso wie das Eintreten von Risiken weitere Folgerisiken begünstigen kann, können auch Maßnahmen die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten von weiteren Risiken erhöhen, weitere Maßnahmen ermöglichen oder ausschließen. Diese Wechselwirkungen sind im System sowohl hinsichtlich der Eintrittswahrscheinlichkeit als auch der Auswirkungen ausführlich zu berücksichtigen. Letztere sind in energieflexiblen Produktionssystemen nicht nur für die logistischen Zielgrößen von Bedeutung, sondern auch für energetische Kennzahlen.
- **Ermöglichung von präventiven und reaktiven Maßnahmen an der Schnittstelle zwischen Produktionsplanung und -steuerung**

Das Maßnahmenspektrum des Risikomanagements umfasst sowohl präventive als auch reaktive Behandlungsstrategien. Um den Handlungsspielraum auszureizen, sind beide Strategien durch das Risikomanagementsystem zu ermöglichen. Die Auswahl der Strategie und geeigneter Maßnahmen durch die Entscheider ist durch objektive und subjektive Methoden zu unterstützen. Da präventive Maßnahmen im Rahmen der Produktionsplanung in den bestehenden Produktionsplan integriert und

reaktive Maßnahmen als alternative Pläne für das Eintreten von Ereignissen der Produktionssteuerung zur Verfügung gestellt werden, sollte das System an der Schnittstelle von Produktionsplanung und Produktionssteuerung platziert werden.

▪ **Automatisierbarkeit der Systeme**

Die letztendliche Entscheidung bei der Auswahl von vorgeschlagenen Handlungsalternativen obliegt weiterhin den Experten des Produktionssystems. Auch ist deren manuelle Eingabe von Einschätzungen und Präferenzen zwischen den Prozessschritten erforderlich. Die Systemelemente und Funktionen sind dagegen weitestgehend automatisierbar zu gestalten, um den Aufwand der in das operative Geschäft eingebundenen Experten zu reduzieren und um die Basis für Weiterentwicklungen für Softwarelösungen für die Industrie zu ermöglichen.

4.2 Systemübersicht und Einordnung der Publikationen

Das Ziel dieses Abschnitts ist es, das Risikomanagementsystem für die energieorientierte PPS mit seinen Systemelementen und Funktion vorzustellen und damit einen Überblick für die nachfolgende, detaillierte Beschreibung des Systems zu geben. Das entwickelte System ist in Abbildung 11 dargestellt und besteht in Anlehnung an die Zielsetzung und drei Forschungsfragen aus Abschnitt 1.2 aus den drei Systemelementen „Systemmodell für die energieorientierte PPS“, „Modellierung der Risiken und Maßnahmen mit Wechselwirkungen“ und einer „Methode zur Risikobehandlung in der energieorientierten PPS“.

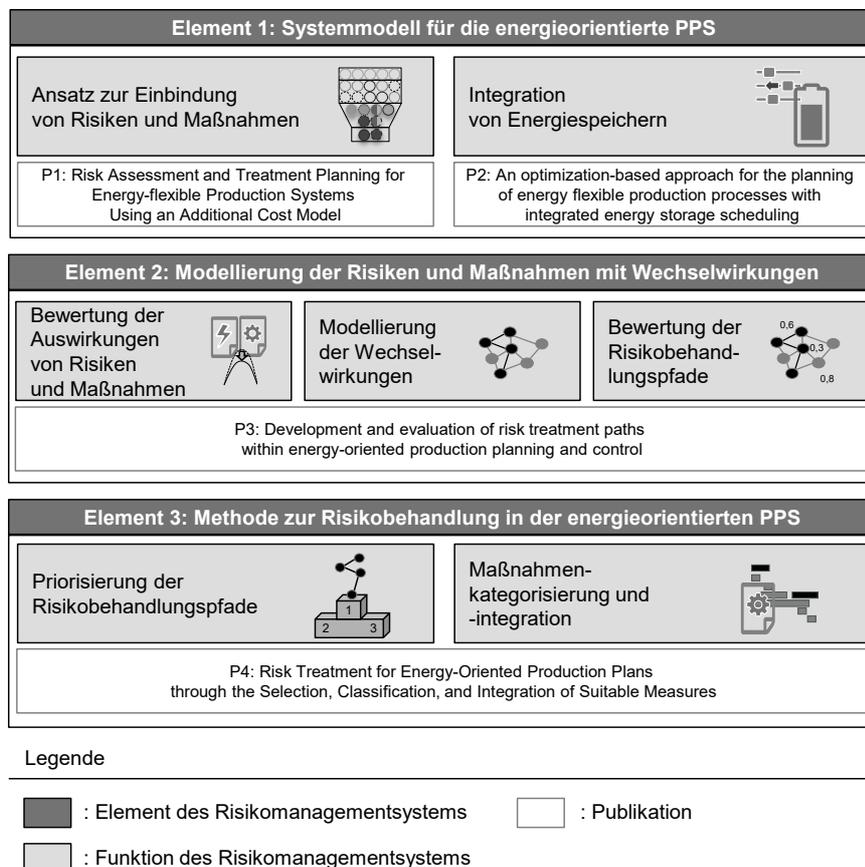


Abbildung 11: Systemübersicht mit Elementen, Funktionen und der Einordnung der Publikationen

Die grundlegende Idee des Systems besteht in der Entwicklung von sogenannten Risikobehandlungspfaden, die eine Kombination von Risiken und Maßnahmen des Produktionssystems enthalten, die als Einzelelemente und mit ihren Wechselwirkungen für den gesamten Pfad bewertet werden (ROTH ET AL. 2021). Nach der Auswahl präferierter Risikobehandlungspfade können die in den Pfaden enthaltenen Maßnahmen mit einer präventiven oder reaktiven Strategie in den risikobehafteten Produktionsplan integriert werden, um so einen risikobehandelten Produktionsplan bzw. Reaktionspläne für das Eintreten von Risiken zu entwickeln (ROTH ET AL. 2022). Die Integration eines Risikobehandlungspfades in einen risikobehafteten Produktionsplan mit einer exemplarischen präventiven und reaktiven Maßnahme ist in Abbildung 12 dargestellt.

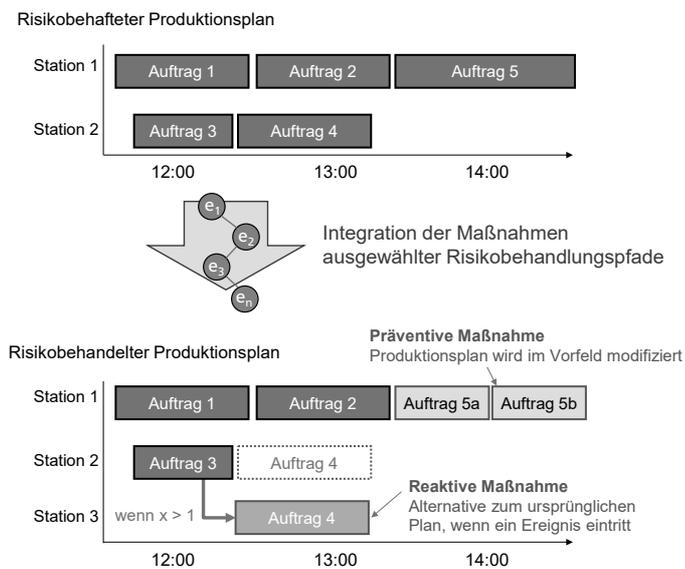


Abbildung 12: Konzept der Risikobehandlungspfade mit der Integration von Maßnahmen (angelehnt an ROTH ET AL. 2021 und ROTH ET AL. 2022)

Im Sinne der publikationsbasierten Dissertation wurden die Ergebnisse zu den Elementen des Systems in vier Publikationen veröffentlicht, die im folgenden Abschnitt 4.3 zur Beschreibung des Systems herangezogen werden. Die Publikationen sind in Abbildung 11 den jeweiligen Funktionen des Systems zugeordnet.

4.3 Systemdarstellung anhand der einbezogenen Publikationen

Basierend auf der in Abschnitt 4.2 vorgestellten Systemübersicht erfolgt in diesem Kapitel die Erläuterung des Risikobehandlungssystems für die energieorientierte PPS anhand der entstandenen vier Publikationen. Der Eigenanteil des Autors an diesen Publikationen ist in Anhang A.3 aufgeführt.

4.3.1 Element 1: Systemmodell für die energieorientierte PPS (Publikation 1 und Publikation 2)

Ansatz zur Einbindung von Risiken und Maßnahmen (Publikation P1)

Die erste Publikation P1 „Risk Assessment and Treatment Planning for Energy-flexible Production Systems Using an Additional Cost Model“ (ROTH ET AL. 2020b) trägt den grundlegenden Rahmen des Systems zur Beurteilung und Behandlung von Risiken als Basis für die weiteren Systemelemente bei. Dies entspricht der Funktion der Einbindung von Risiken und Maßnahmen in das Systemmodell im Rahmen von Systemelement 1. Die Arbeit wurde mit einem Vortrag auf der „IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management“ im Jahr 2020 vorgestellt und erschien anschließend als Artikel im Konferenzband.

Hierzu wurde zunächst ein Ansatz entwickelt, der Produktionsrisiken anhand der Eintrittswahrscheinlichkeit P , des Schadensausmaß E und des neu eingeführten kritischen Filterfaktors C bewertet. Der kritische Filterfaktor C ermöglicht es, die monetären Auswirkungen des unmittelbaren Schadensmaßes vorab abzuschätzen und so eine Auswahl relevanter Risiken für die weitere Untersuchung zu treffen. Abbildung 13 zeigt exemplarisch und in Anlehnung an einen Filter das Vorgehen zur Klassifizierung der Risiken. Überschreitet das Risiko einen festzulegenden Schwellwert, gilt es als relevant für die weitere Betrachtung im Rahmen der Risikobehandlung.

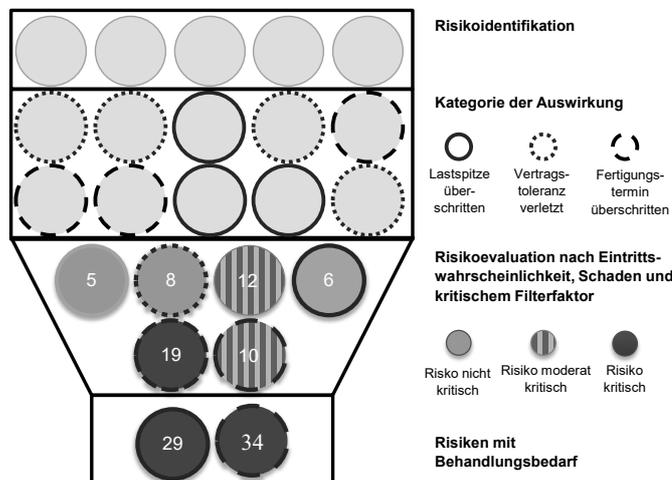


Abbildung 13: Klassifizierung und Filterung der Risiken (angelehnt an ROTH ET AL. 2020b und WEBER 2020)

Der Ansatz beinhaltet schließlich ein Ablaufschema zur Auswahl und Implementierung von präventiven und reaktiven Maßnahmen. Ein Kostenmodell wurde entwickelt, welches Zusatzkosten durch Risiko- und Maßnahmenauswirkungen abbildet und in ein analytisches Lösungsverfahren überführt und mit der Zielfunktion die gesamten Zusatzkosten als Summe

aus Risikokosten und Maßnahmenkosten minimiert. Es ermöglicht die monetären Auswirkungen von Risiken und Maßnahmen zu bewerten und so zwischen dem präventiven und reaktiven Einsatz der Maßnahmen abzuwägen.

Die wichtigsten Erkenntnisse von ROTH ET AL. (2020b) lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Es wurde ein grundlegendes Systemmodell geschaffen, das in die energieorientierte PPS auf operativer Ebene für das Risikomanagement integriert werden kann und dabei präventive und reaktive Maßnahmen ermöglicht.
- Eine Klassifizierung und Vorauswahl kritischer Produktionsrisiken reduziert den Aufwand der weiteren Risikobehandlung, indem Risiken mit geringer monetärer Schadensauswirkung herausgefiltert werden. Das entsprechende Vorgehen dazu wurde vorgestellt, angewendet und validiert.
- Ein Zusatzkostenmodell kann die Auswirkungen von Risiken und Maßnahmen abbilden und eignet sich zwischen Zielkonflikten zwischen verschiedenen logistischen und energetischen Kennzahlen in energieflexiblen Produktionssystemen abzuwägen.

Integration von Energiespeichern (Publikation P2)

In den Ansätzen von Publikation P1 wurden Energiespeicher lediglich als relevant für die Risikoidentifikation erwähnt. Da Energiespeichern neben Energieflexibilitätsmaßnahmen des Produktionssystems eine hohe Bedeutung bei der Lastflexibilisierung zukommt, enthält Systemelement 1 die Funktion zur Integration von Energiespeichersystemen in einen Planungsansatz. Diese wurde im Rahmen von Publikation P2 „An optimization-based approach for the planning of energy flexible production processes with integrated energy storage scheduling“ (ROTH ET AL. 2020a) erarbeitet. Die Arbeit wurde mit einem Vortrag auf der „13. CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering“ im Jahr 2019 vorgestellt und erschien als Artikel im entsprechenden Konferenzband. Das Ziel war eine anwendungsnahe Speichereinsatzplanung in Kombination mit der Reihenfolgeplanung von Fertigungsaufträgen unter Berücksichtigung energieflexibler Energieverbräuche zu entwickeln. Basierend auf dem für die Reihenfolgeplanung üblichen analytischen Verfahren (BANK ET AL. 2019) wurde ein Mixed-Integer Linear Programming (MILP) Ansatz entwickelt, der mit der Zielfunktion die Kosten für den Energiebezug minimiert.

Anhand von sechs Nebenbedingungen wurden die technischen Randbedingungen des Batteriespeichersystems abgebildet, mit fünf weiteren Nebenbedingungen werden die Einschränkungen bei der flexiblen Einplanung von Aufträgen auf verschiedene Produktionsstationen beschrieben. Durch die Vergleichbarkeit der analytischen Ansätze im Hinblick auf die Kostenorientierung der Zielfunktionen in Publikation P1 und Publikation P2 kann durch eine Anpassung des Optimierungsproblems der Batteriespeichereinsatz als Puffer für mögliche Produktionsrisiken geplant werden. Darauf wird im Ausblick in ROTH ET AL. (2020a) hingewiesen.

Die wichtigsten Erkenntnisse von ROTH ET AL. (2020a) lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die angestrebte Integration von Batteriespeichersystemen lässt sich im Risikomanagementsystem neben situativen Lade- und Entladevorgängen auch auf der Planungsebene in Kombination mit flexiblen Produktionsprozessen und Aufträgen vornehmen.
- Die Planung kann im Kontext der energieorientierten PPS mittels geeigneter Zielfunktion und Randbedingungen durch ein kombiniertes Scheduling der Belegungsplanung von Produktionsstationen und des Batteriespeichers durchgeführt werden, ohne vertieft in die Zuständigkeiten des Energiemanagements oder Lastmanagements einzugreifen.

4.3.2 Element 2: Modellierung der Risiken und Maßnahmen (Publikation 3)

Systemelement 2 enthält Funktionen zur Modellierung von Risiken und Maßnahmen mit deren Wechselwirkungen. Publikation P3 „Development and evaluation of risk treatment paths within energy-oriented production planning and control“ (ROTH ET AL. 2021) stellt dazu einen Ansatz zur Modellierung von Risiken und Maßnahmen mit deren Auswirkungen und Wechselwirkungen vor und baut dabei auf dem grundlegenden Ansatz der Einbringung von Risiken und Maßnahmen aus Systemelement 1 auf. Der Artikel erschien im März 2021 in der Fachzeitschrift „Production Engineering Research and Development“.

Der Ansatz beginnt mit der Funktion zur Bewertung der Schadensauswirkungen der Risiken und Maßnahmen in Form eines hierfür entwickelten Steckbriefs. Beispiele für Parameter sind Veränderungen in der Durchlaufzeit in Zeiteinheiten (ZE), ein Abweichen des Lastgangs in kW und eine Änderung des Energiebedarfs in kWh. Die entgegengesetzte Wirkung von Maßnahmen zu den Risiken wird mit einem umgekehrten Vorzeichen abgebildet.

Nach der Erstellung des Risikoinventars und Maßnahmenkatalogs als analog beschriebene Einzelemente folgt die Funktion zur Modellierung der Wechselwirkungen dieser Elemente, wobei hier beachtet werden muss, dass Risiken zu weiteren Risiken führen können oder der Einsatz von Maßnahmen weitere Risiken bewirken oder ausschließen kann. Hierzu werden mit ROTH ET AL. (2021) sogenannte Risikobehandlungspfade eingeführt, die alle möglichen Kombinationen von Risiken und Maßnahmen innerhalb eines Produktionssystems abbilden. Das Vorgehen zur Entwicklung dieser Pfade basiert zunächst auf ISM, mit dem komplexe Wechselwirkungen von Elementen durch eine Reihe festgelegter Schritte in Form eines grafischen Modells abgebildet werden können (PFOHL ET AL. 2011) und der darauf folgenden Ermittlung bedingter Wahrscheinlichkeiten zwischen den Elementen, basierend auf dem Ansatz der bayesschen Netze. Publikation P3 präsentiert abschließend die Funktion zur Bewertung der Risikobehandlungspfade. Diese erfolgt durch die Priorisierung der Risikobehandlungspfade anhand von drei Bewertungskriterien in Form eines Trilemmas mit den Kriterien *Kosten*, *Risiko* und *Energieflexibilität*. Im Anschluss werden ein Vorgehen

und Formeln zur Ermittlung dieser Werte mittels der Errechnung der mittelbaren sowie monetären Auswirkungen durch die Weiterentwicklung des Kostenmodells aus Publikation P1 aufgezeigt.

Die wichtigsten Erkenntnisse von ROTH ET AL. (2021) lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Der entwickelte Ansatz ermöglicht die Bewertung von Risiken und Maßnahmen als Einzelelemente hinsichtlich deren logistischen und energetischen Auswirkungen anhand von Steckbriefen. Neben Elementen des Produktionssystems können Laständerungen durch Batteriespeicher in den Ansatz integriert werden.
- Mittelbare Auswirkungen in Form von Delta-Werten können zeitlich in den Produktionsplan und Lastgang eingeordnet werden um die absoluten Veränderungen zu er rechnen.
- Der neuartige Ansatz der Risikobehandlungspfade, mit dem alle möglichen Kombination an Risiken und Maßnahmen eines energieflexiblen Produktionssystems abgebildet werden können, wird eingeführt.
- Ein auf einem Trilemma basierendes Kennzahlensystem ermöglicht eine spätere Priorisierung der Pfade.

4.3.3 Element 3: Methode zur Risikobehandlung (Publikation 4)

Auf die Modellierung der Risiken und Maßnahmen im Rahmen von Systemelement 2 folgt die Risikobehandlung in der energieorientierten PPS durch Systemelement 3. Es gliedert sich in die Funktion zur Priorisierung der Risikobehandlungspfade und die Funktion zur Maßnahmenkategorisierung und -integration. Die Ergebnisse der Publikation P4 „Risk Treatment for Energy-Oriented Production Plans through the Selection, Classification, and Integration of Suitable Measures“ (ROTH ET AL. 2022) entsprechen diesen Funktionen. Sie setzen unmittelbar an dem in Publikation P3 vorgestellten Ansatz zur Entwicklung von Risikobehandlungspfaden an und verfolgen das Ziel, zunächst ein strukturiertes Vorgehen zur Auswahl eines geeigneten Pfads und zur Integration der enthaltenen Maßnahmen in den Produktionsplan darzustellen. Der Artikel erschien im Juni 2022 in der Fachzeitschrift „Applied Sciences“ in der Spezialausgabe „New Trends in Production and Operations Management“.

Für die Funktion der Priorisierung von Risikobehandlungspfaden wird mit Publikation P4 ein an die Ansätze des MCDM angelehntes Verfahren eingeführt. Um die Kriterien subjektiv, d.h., nach der Einschätzung der Experten des Produktionssystems, zu bewerten, wird der paarweise Vergleich anhand AHP eingesetzt. Zur Unterstützung des paarweisen Vergleichs wurden Entscheidungshilfen auf das spezifische Problem des Risikomanagements in der energieorientierten PPS formuliert. Eine objektive Bewertung der Kriterien ist durch die Berechnung der Entropie gegeben. Die so ermittelten subjektiven und objektiven Gewichtungen werden durch die multiplikative Aggregation zu einer finalen Gewichtung für jedes Trilemmakriterium zusammengeführt. Die Bewertung der Alternativen zu den drei Trilemmakriterien findet mithilfe von MAUT statt, durch die die Gesamtnutzenwerte anhand der aggregierten Gewichtung errechnet werden, um eine priorisierte Liste der Pfade zu erstellen.

Für die Auswahl der zu integrierenden Pfade können im Kreis der Experten des Produktionssystems nun beispielsweise die ersten 10 bis 20 Pfade betrachtet werden oder Schwellwerte gesetzt werden wie beispielweise eine gewisse Anzahl an Risikoelementen, die in den zu betrachtenden Pfaden enthalten sein müssen. Für die Funktion der Maßnahmenkategorisierung und -integration werden im Rahmen der Publikation P4 die Energieflexibilitätsmaßnahmen nach VDI 5207-1 (2020) den Kategorien der präventiven und reaktiven Maßnahmen zugeordnet, um eine Entscheidungshilfe zur Einsatzstrategie für die auf dem gewählten Pfad enthaltenen Maßnahmen bereitzustellen. Nach der Kategorisierung der Maßnahmen folgt die Integration in den Produktionsplan. Im Hinblick auf den erfolgreichen Einsatz von mathematischen Optimierungen in den Vorarbeiten der Publikationen P1 und P2 baut der Algorithmus hierzu ebenfalls auf diesem Ansatz auf. Als Teil der Risikobehandlung verfolgt die Zielfunktion statt der üblichen Kostenminimierung anhand der Schwankungen von Preisprognosen die Minimierung möglicher zeitabhängiger Pönalen für Abweichungen vom ursprünglich eingekauften Stromverbrauch.

Die wichtigsten Erkenntnisse von ROTH ET AL. (2022) lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Ein auf AHP und Entropie basierendes Verfahren zur subjektiven bzw. objektiven Gewichtung der Risikobehandlungspfade wurde vorgestellt. Mittels einer Nutzenfunktion und Errechnung der spezifischen Nutzenwerte ist eine Priorisierung und damit Auswahl von Risikobehandlungspfaden möglich.
- Die Energieflexibilitätsmaßnahmen nach VDI 5207-1 (2020) wurden präventiven und reaktiven Maßnahmen zugeordnet, um eine Entscheidungshilfe zur Einsatzstrategie bereitzustellen.
- Die Einbindung der Maßnahmen erfolgt durch einen optimierungsbasierten Algorithmus und ist damit gut automatisierbar und in bestehende Systeme integrierbar. Mittels eines Scheduling-Algorithmus werden sowohl präventive Maßnahmen als auch reaktive Maßnahmen integriert.

5 Diskussionsteil mit Anwendung, Bewertung und Reflexion

5.1 Anwendung und Bewertung

5.1.1 Softwaretechnische Umsetzung

Das entwickelte System für das Risikomanagementsystem weist in Bezug auf die erzeugten Daten und erforderlichen Verarbeitungsschritte ein hohes Potenzial für die Softwareunterstützung auf, welche den zeitlichen Aufwand und die Komplexität für die Anwender stark reduzieren kann.

Im diesem Sinne wurden die Systemelemente „Modellierung der Risiken und Maßnahmen mit Wechselwirkungen“ und „Methode zur Risikobehandlung in der energieorientierten PPS“ in Form der Programme „Beurteilung“ bzw. „Behandlung“ in MathWorks MATLAB® (MATHWORKS 2018b, 2019) umgesetzt. Die Software ist prädestiniert für die Verarbeitung von Eingangsdaten in Matrizenform, welche beispielsweise bei Risikoinventar, Maßnahmenkatalog und der SSIM vorliegen (KALCHSCHMID 2020, S. 88). Die Eingabe von Auftragsdaten und Lastgängen erfolgt mittels einheitlich erstellten Comma-separated values (CSV) Dateien, welche beispielsweise mit der in Unternehmen weit verbreiteten Tabellenkalkulationssoftware Microsoft Excel gelesen und bearbeitet werden können. Abbildung 14 zeigt eine vereinfachte Übersicht über die beiden Programme und deren Unterprogramme mit Datenflüssen.

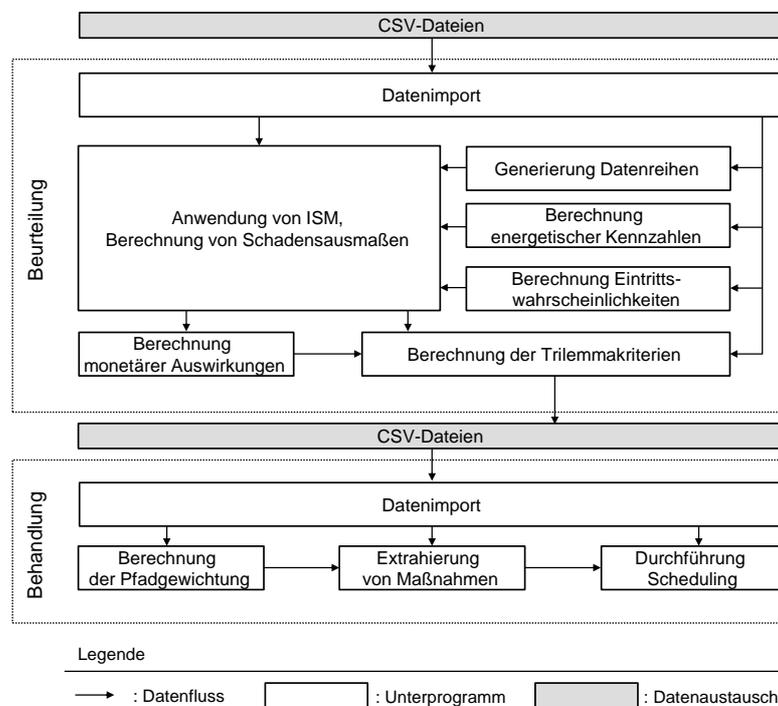


Abbildung 14: Vereinfachte Übersicht über die Unterprogramme und Datenflüsse der softwaretechnischen Umsetzung (angelehnt an KALCHSCHMID 2020, S. 89 und HUBER 2021, S. 104)

Beispielhaft genannt werden soll an dieser Stelle das Unterprogramm „Datenimport“, das u.a. dem Import von Lastgängen, Auftragsdaten und Kostendaten dient und so als Schnittstelle zu beispielsweise Energiemanagementsoftware und ERP-Systemen fungiert. Das Unterprogramm „Durchführung Scheduling“ führt die in ROTH ET AL. (2022) vorgestellte Integration von Maßnahmen in Form einer Belegungsplanung durch. Statt des Unterprogramms in MATLAB kann alternativ eine Schnittstelle zu einem im Unternehmen eingesetzten MES oder APS-System zur Übernahme dieser Funktion aufgebaut werden, oder die Ergebnisse des MATLAB Unterprogramms werden in der für die Anwender gewohnten Umgebung des MES oder APS visualisiert. Eine Übersicht zu den Unterprogrammen und deren detaillierte Beschreibung findet sich in KALCHSCHMID (2020) und HUBER (2021).

Für die Anwendung am Industriebeispiel wurde ein Graphical User Interface (GUI) in der Umgebung des MATLAB® App Designer entworfen (MATHWORKS 2018a). Abbildung 15 zeigt exemplarisch die Visualisierung der bewerteten Pfade anhand des Trilemmas. In der Tab-Leiste am oberen Rand des Screenshots sind weitere Tabs zu erkennen, beispielsweise zum Vergleich einzelner Pfade. Diese sind ausführlich in ROTH ET AL. (2021) beschrieben.

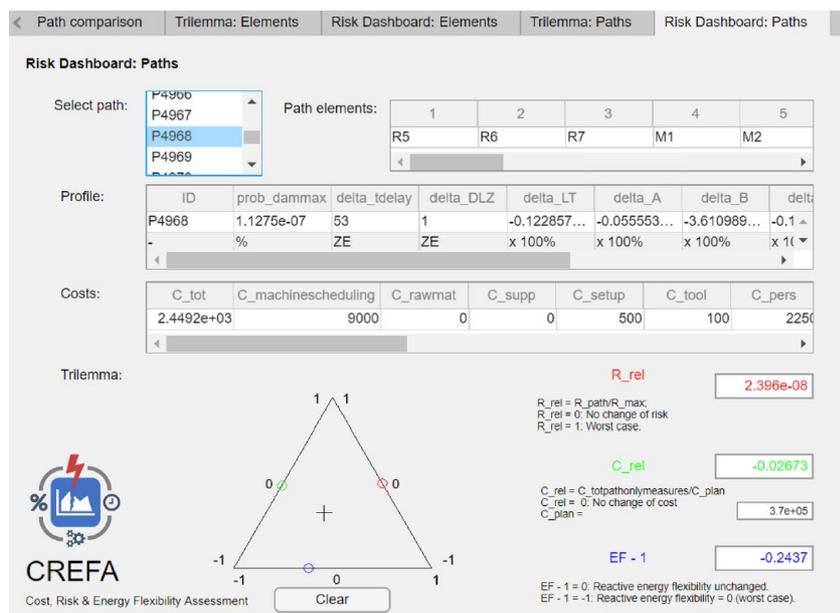


Abbildung 15: Screenshot des Softwaretools in MATLAB® (ROTH ET AL. 2021)

5.1.2 Beschreibung des Anwendungsbeispiels Gießerei

Bei dem herangezogenen Unternehmensbereich handelt es sich um die Großteilgießerei eines Maschinen- und Anlagenbauers, welcher im Rahmen des vom Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Forschungsprojekts „SynErgie“ umfassend betrachtet wurde. „SynErgie“ ist Teil des Förderprogramms „Kopernikus“ und untersucht die Potenziale der Industrie bei der Anpassung des elektrischen Stromverbrauchs an ein flexibles Energieangebot. (SAUER ET AL. 2019)

Um keine vertraulichen Informationen offen zu legen, werden unternehmensinterne Informationen und Daten in diesem Kapitel abstrahiert wiedergegeben. Insbesondere die Risikoauswirkungen und -häufigkeit sowie vertraglich festgelegte Angaben wurden verfremdet, um Rückschlüsse auf sensible Informationen auszuschließen.

Gießereien führen energieintensive Schmelzvorgänge durch und bilden häufig den Beginn der Lieferkette in der Automobil- und Maschinenbaubranche. Damit sind sie ein wichtiger Ansatzpunkt für die Dekarbonisierung und Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit von Wertschöpfungsketten. (KALCHSCHMID ET AL. 2021) Die untersuchte Großteilgießerei bildet den Beginn der Wertschöpfung am Unternehmensstandort des Maschinen- und Anlagenbauers zur Herstellung von Motoren. Die folgenden Beschreibungen des Anwendungsfalls sind angelehnt an die Arbeiten von HUND (2018) und BOLLIG (2019) sowie ROTH ET AL. (2021) und ROTH ET AL. (2022), in denen sich eine weiterführende detaillierte Beschreibung der Gegebenheiten findet.

Auf das Schmelzen und Gießen innerhalb der Gießerei folgen die mechanische Nachbearbeitung, Reinigung, Lackierung und abschließende Montagearbeiten. Neben Roheisen werden Stanzabfälle, Stahlprofile und Material aus dem Gießereikreislauf mit vier elektrisch betriebenen Induktionsöfen aufgeschmolzen. Der Materialfluss ist in Abbildung 16 dargestellt. Die zwei kleineren identischen Öfen 1 und 4 werden für das Aufschmelzen kleinerer Chargen verwendet. Für große Chargen werden die ebenfalls identischen Öfen 2 und 3 herangezogen, die jeweils fast die vierfache Tonnage von Ofen 1 und 4 schmelzen können. Bei der Herstellung größerer Chargen werden zunächst die beiden kleinen Öfen für das Aufschmelzen eines sogenannten Sumpfs verwendet, der dann nach und nach in die größeren Öfen umgefüllt wird, bis die gewünschte Schmelzmasse erreicht wird. In speziellen Behandlungspfannen wird die Schmelze anschließend mit chemischen Maßnahmen behandelt und daraufhin auf Gusspfannen verteilt. In diesen wird die Schmelze mittels Gabelstaplern zu den acht Abgussfeldern transportiert. Dort werden die Transportpfannen von Kränen aufgenommen und die Schmelze in die direkt am Abgussfeld aufgebauten Sandformen eingegossen. Die Formen bestehen jeweils aus einem Formkasten, der direkt auf dem Abgussfeld aufgebaut wird und Kernen, welche mit einem Gabelstapler zum Abgussort transportiert werden.

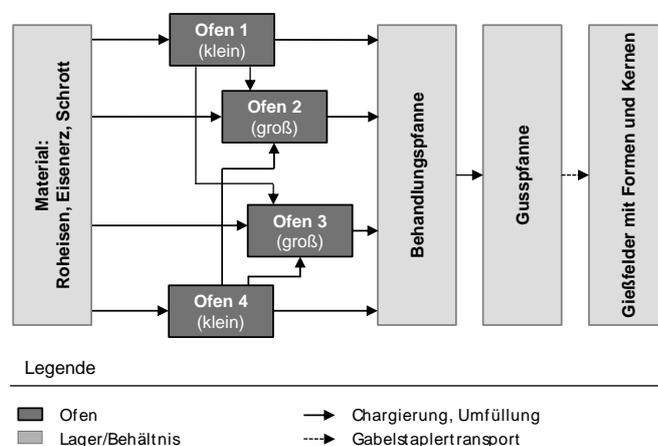


Abbildung 16: Materialflüsse in der Großteilgießerei (angelehnt an ROTH ET AL. 2021)

5.1.3 Durchführung der Anwendung und Ergebnisse

Systemmodell für die energieorientierte PPS

Das in Publikation P1 entwickelte Systemmodell bildete den Rahmen für die Strukturierung der Arbeiten zur Einführung des Risikomanagements in den betrieblichen Ablauf. Die initiale Identifikation und Bewertung von Risiken erfolgte anhand von Workshops mit den Experten der Gießerei. Zum Einsatz kamen die in Publikation P1 aufgeführten manuellen Verfahren, darunter insbesondere die FMEA. Mit der Methode zur Ermittlung des kritischen Filterfaktors konnten relevante Risiken für das Risikoinventar zur weiteren Betrachtung mit angemessenem Aufwand von Risiken mit geringer Bedeutung unterschieden werden. Beispielhafte Risiken sind *fehlerhafte Formen*, der *Ausfall von Öfen* sowie der *Ausfall von Gabelstaplern*. Zu diesen Risiken wurde mit den Experten der Gießerei ein Maßnahmenkatalog erstellt, wobei die Energieflexibilitätsmaßnahmen des Produktionssystems den Ausgangspunkt darstellten. Der Maßnahmenkatalog wurde um die Einschätzungen von erfahrenen Wissenschaftlern des Fraunhofer IGCV aus dem Gießereibereich ergänzt. Weiterhin wurde branchenspezifische Literatur herangezogen, beispielsweise NOTTMEYER (2008), sodass geeignete Maßnahmen wie die *Erstellung von Ersatzformen* oder die *Anpassung der Ofenbelegung* herausgearbeitet wurden. Eine Übersicht mit exemplarischen Risiken und Maßnahmen findet sich in Publikation P4 in Tabelle 3. Das in Publikation P1 entwickelte Kostenmodell wurde herangezogen, um mittels einer mathematischen Optimierung zur Reduktion der Zusatzkosten von Risiko- und Maßnahmenkombinationen eine erste Einschätzung zur Wirtschaftlichkeit der Umsetzung zu treffen. Im Zuge des Aufbaus des Systemmodells erfolgte die Erprobung der in die Auftragsplanung integrierten Planung der Energiespeicherlade- und Entladevorgänge mit Publikation P2. Dazu wurden u.a. im Rahmen der Arbeiten von STUMPE (2019) anhand eines separaten Produktionssystems die Randbedingungen eines Batteriespeichersystems und zeitlich flexible Aufträge eines Stickstoffgenerators und einer Laserschneideanlage über das entwickelte Optimierungsverfahren anhand von Nebenbedingungen modelliert. Die Ergebnisse zeigten, dass das gleichzeitige Scheduling von Batteriespeichern und flexiblen Aufträgen als potenzielle Maßnahmen zur Risikobehandlung durch das Optimierungsproblem ermöglicht wird.

Modellierung der Risiken und Maßnahmen mit Wechselwirkungen

Unter Verwendung der in Publikation P3 vorgestellten Steckbriefe wurden die Auswirkungen der Risiken und Maßnahmen des Gießereibetriebs beschrieben. Zur Aufnahme der Daten wurden Gespräche mit den Experten des Produktionssystems geführt und historische Auftrags- und Energiedaten ausgewertet, um beispielsweise die risikoinduzierten Verzögerungen an Produktionsstationen und Lastgangveränderungen zu ermitteln. Dem in Publikation P3 veröffentlichten Ansatz folgend sind die anhand der Auswirkungen bewerteten Risiken und Maßnahmen mittels ihrer Wechselwirkungen zu bewerten. Dazu wurden zunächst die grundlegenden Wechselwirkungen mittels ISM festgestellt. Für die Anwender des Produktionssystems bedeutete dies, dass zu jeder Kombination von Risiken und Maßnahmen festgelegt werden musste, ob bidirektionale, unidirektionale oder keine Wechselwirkungen bestehen. Die weiteren Schritte zur Erstellung des Strukturmodells konnten ohne Zutun der

Anwender über einen Algorithmus erfolgen. Um aus dem Strukturmodell mögliche Risikobehandlungspfade zu erstellen, sind dem Strukturmodell bedingte Wahrscheinlichkeiten zu ergänzen. Entsprechend dem Ansatz der bayesschen Netze wurden durch die Experten jeder Kante des Strukturmodells bedingte Eintrittswahrscheinlichkeiten zugeordnet. So wurde für jedes Element festgelegt, wie wahrscheinlich dessen Eintreten ist, wenn die Vorgängerelemente eingetreten oder nicht eingetreten sind. Im Beispiel der betrachteten Gießerei mit 10 Risiken und 13 Maßnahmen mussten durch die Anwender 23 bedingte Wahrscheinlichkeiten manuell eingetragen werden. Es entstanden rund 7.500 Pfade mit möglichen Risiko-Maßnahmen-Kombinationen. Für diese Risikobehandlungspfade wurden im Anschluss die festgelegten Trilemmakriterien entsprechend der in Publikation P3 aufgeführten Formeln berechnet.

Methode zur Risikobehandlung in der energieorientierten PPS

Die Priorisierung der Risikobehandlungspfade folgt dem in Publikation P4 vorgestellten Vorgehen, dass initial eine Gewichtung der Trilemmakriterien vorsieht. Für die subjektive Gewichtung wurden die Präferenzen der Entscheider mittels AHP abgefragt. Die Entscheidungen zum paarweisen Vergleich wurden durch die spezifisch für energieflexible Produktionssysteme entwickelten Handlungsempfehlungen unterstützt. Im vorliegenden Fall entschieden sich die Experten für eine hohe Gewichtung der Energieflexibilität, da die Aufträge im Betrachtungszeitraum sehr eng getaktet waren und für die Überschreitung von Fristen hohe Pönalen erwartet wurden. Weiterhin wurde die Risikoreduktion gegenüber den Kosten sehr hoch gewichtet, da die Erfüllung der Kundenanforderungen durch die Vermeidung von Risikoauswirkungen bei einer hohen Toleranz für entsprechende Maßnahmenkosten gesichert werden sollte. (vgl. Tabelle 4 in Publikation P4)

Die objektive Gewichtung über die Entropie konnte, wie in Publikation P4 beschrieben, aus den generierten Daten der Bewertungen der Pfade mittels Algorithmen errechnet werden, um Verzerrungen durch stark subjektive Entscheidungen auszugleichen. Dabei wurde die Risikoreduktion im Vergleich zu den anderen beiden Kriterien sehr hoch gewichtet, da die verfügbaren Daten zur Risikoreduktion eine geringe Streuung aufweisen und damit mit geringen Unsicherheiten verbunden sind. Anschließend wurden den Kriterien *Kosten* und *Energieflexibilität* eine konvexe Nutzenfunktion (hohe Anzahl an Ausprägungen im oberen Drittel der Skala) und dem Kriterium *Risikoreduktion* eine lineare Nutzenfunktion (hohe Anzahl an Ausprägungen im mittleren Drittel der Skala) zugeordnet. Anschließend wurde für jeden Risikobehandlungspfad zu jedem Trilemmakriterium der Nutzen ermittelt. Durch die Gewichtung der Trilemmakriterien konnte für jeden Pfad ein Gesamtnutzen ermittelt werden, nachdem die Pfade in absteigender Reihenfolge angeordnet wurden (vgl. Tabelle 5 in Publikation P4).

Für einen beispielhaft betrachteten Fertigungstag wurden die Maßnahmen der ersten drei Risikobehandlungspfade für die Integration der Maßnahmen in den Produktionsplan ausgewählt, da auf diesen drei Pfaden alle als relevant eingeschätzten Risikokombinationen enthalten waren. Die enthaltenen Risiken lauteten *fehlerhafter Kern* und *Ausfall von Ofen 4* und

waren mit den Maßnahmen *Erstellung eines Ersatzkerns* bzw. *Anpassung der Ofenbelegungsplanung*, *Anpassung des Prozessstarts* und *Anpassung der Prozessparameter* assoziiert. Unter Zuhilfenahme der an die VDI 5207-1 (2020) angelehnten Handlungsempfehlung aus Publikation P4 konnten die Maßnahmen durch die Anwender der Kategorie präventiv oder reaktiv zugeordnet werden. Die als reaktiv klassifizierte Maßnahme der *Erstellung eines Ersatzkerns* kann im Falle des Eintretens eines fehlerhaften Kerns flexibel in einem längeren Zeitintervall platziert werden und wurde mithilfe des Scheduling-Ansatzes aus Publikation P4 zu Zeiten mit niedrigen Prognosen für Pönalen für die Abweichung vom beschafften Lastgang und unter Berücksichtigung zu vermeidender Lastspitzen platziert.

Die reaktive Maßnahme der *Anpassung der Ofenbelegungsplanung* wurde in einem Reaktionsplan für die Verschiebung von Ofen 4 auf Ofen 1 hinterlegt. Als Folge dessen wurde präventiv der Prozessstart von Ofen 2 nach hinten verschoben sowie die Prozessdauer auf Ofen 3 durch ein Absenken der Temperatur verlängert, um die Abgusszeiten der beiden Öfen zu synchronisieren und lange Warmhaltezeiten zu vermeiden (vgl. Abbildung 7 in Publikation P4). Durch die Vorbereitung der Reaktivmaßnahmen für einen fehlerhaften Kern und den Ausfall des Ofens mit korrigierenden Präventivmaßnahmen können im Fall des fehlerhaften Kerns die Kosten für die Abweichung vom ursprünglichen Lastgang durch die Platzierung von Zeiten mit geringen prognostizierten Pönalen um 173 € gesenkt werden (basierend auf den regelzonenübergreifenden einheitlichen Bilanzausgleichsenergiepreisen (reBAP) der Übertragungsnetzbetreiber vom 30.11.2022, vgl. ÜBERTRAGUNGSNETZBETREIBER 2023). Basierend auf der Risikobeurteilung kann von einem Eintreten von etwa zwei fehlerhaften Kernen pro Woche ausgegangen werden. Die jährlich vermiedenen Kosten für hohe Pönalen für Abweichungen von der beschafften Energie kumulieren sich so ausgehend von 104 Vorfällen pro Jahr auf 17.992 €. Eine Lastspitze von 600 kW, welche durch die Anpassung der Prozessparameter an Ofen 3 vermieden wurde, hätte bei den Netzentgelten im Betrachtungsjahr durch vertragliche Vereinbarungen zum Leistungspreis Zusatzkosten von 19.200 € bewirkt. Die Einsparungen für die Lastspitze werden im Betrachtungsfall nur einmal angesetzt, da sich im vorliegenden Anwendungsfall lediglich die Jahreshöchstlast auf die Ermittlung der Netzentgelte niederschlägt. Durch die veränderte Ofenbelegungsplanung, den veränderten Prozessstart und die veränderte Prozessdauer entstehen ebenfalls Abweichungen vom ursprünglichen Lastgang. Da es sich um Präventivmaßnahmen handelt, kann die Energie bei der Beschaffung am Day-Ahead Markt im Vorfeld berücksichtigt werden, es entfällt daher keine Pönale. Weiterhin kann durch die schnelle Reaktion auf den Ofenausfall die Verzögerung des Liefertermins um acht Zeiteinheiten vermieden werden. Dies entspricht bei einer vertraglich vereinbarten Pönale von 312 € pro Zeiteinheit 2.496 €. Ofenausfälle treten etwa zwei Mal pro Jahr in Erscheinung, die jährliche Ersparnis für die Vermeidung von Vertragsstrafen für Lieferverzögerungen beträgt damit 4.992 €. Tabelle 3 führt die einzelnen Positionen der vermiedenen Kosten auf.

Tabelle 3: Übersicht über die vermiedenen Kosten

Position	Kosten pro Ereignis	Häufigkeit pro Jahr	Jährliche Gesamtkosten
Vermiedene Jahreshöchstlast	19.200 €	1	19.200 €
Vermiedene Pönale für Abweichung vom beschafften Lastgang	173 €	104	17.992 €
Vermiedene Pönale für einen verzögerten Liefertermin	2.496 €	2	4.992 €
Summe			42.184 €/a

5.1.4 Kosten-Nutzen-Bewertung

Für eine Einschätzung der Anforderung an die Wirtschaftlichkeit des entwickelten Systems ist eine Betrachtung von Kosten und Nutzen erforderlich, damit eine Aussage über die Rentabilität getroffen werden kann. Der Fokus liegt dabei nicht auf einer anwendungsfallspezifischen und präzisen Betrachtung, sondern auf einem möglichst allgemeingültigen und übertragbaren Rahmen für die generelle Einschätzung. Die Preisdaten entsprechen daher marktüblichen Durchschnittsdaten und die Anzahl an Personentagen (PT) ergeben sich durch Annahmen für den erwartbaren durchschnittlichen Aufwand.

Kosten

Das System verursacht einmalige Investitions- und Implementierungskosten sowie Betriebskosten, welche in unterschiedlicher Häufigkeit für die Nutzung des Systems anfallen. Zu den Investitionskosten gehören einmalige Kosten für eine Softwarelizenz zur Umsetzung der Algorithmen des Risikomanagementsystems. Ausgehend von der im Anwendungsfall eingesetzten Software können vergleichbare Softwarelösungen für eine Unternehmenslizenz mit für einen Anwender einmaligen Kosten von 16.500 € angesetzt werden. Hinzu kommen Lizenzkosten für das Risikomanagementsystem mit einmaligen Kosten von 12.800 €. Weitere Softwarelösungen wie Microsoft Excel zur Erstellung der Templates für den Datenaustausch zwischen den Systemen sowie Energiemanagement-, ERP- und ME-Systeme für den Export von Daten bzw. die Visualisierung von Ergebnissen, werden aufgrund der weiten Verbreitung in der Industrie als vorhanden vorausgesetzt. Weiterhin kann bei Unternehmen, welche bereits eine energieorientierte PPS implementierten, davon ausgegangen werden, dass Zugänge zu EPEX Spot für Energiepreisprognosen bereits vorliegen.

Neben den Softwarelizenzkosten fällt Personalaufwand an. Es werden durchschnittliche Kosten von 850 € pro PT kalkuliert, davon ausgehend, dass Experten im Bereich der IT sowie des Produktions- und Energiemanagements eingesetzt werden. Für den Aufbau von

Schnittstellen zu den bestehenden Softwarelösungen sind 9 PT anzusetzen, was Kosten von 7.650 € bedeutet. Weiterhin entfallen Kosten für den Aufbau des Systemmodells mit 15 PT und damit über 12.750 €.

Bei den Betriebskosten ist der Aufwand für die Risikobeurteilung und Risikobehandlung separat zu betrachten, da diese in unterschiedlicher Häufigkeit anfallen. Die Risikobeurteilung enthält die Modellierung von Risiken und Maßnahmen mit der Bewertung der Auswirkungen, Modellierung der Wechselwirkungen sowie der Erstellung der Risikobehandlungspfade durch die Einbindung der bedingten Wahrscheinlichkeiten. Sie wird erforderlich, wenn sich Änderungen im Produktionssystem oder Produktionsprogramm ergeben, bei der Änderung von Marktmodellen oder bei Verfeinerungen der Parametrisierung aufgrund von Rückmeldungen der Produktionssteuerung. Hierbei sind häufig kleinere Parametrisierungen und gelegentliche umfangreichere Anpassungen zu erwarten. Es wird im Durchschnitt von zwei PT pro Quartal für einen mit der Anwendung vertrauten Personenkreis ausgegangen, was bei Kosten von durchschnittlich 850 €/PT jährlich 6.800 € entspricht. Die Risikobehandlung enthält die Priorisierung der Risikobehandlungspfade, die Auswahl eines Pfades mit der anschließenden Kategorisierung der enthaltenen Maßnahmen sowie deren Integration in den Produktionsplan. Das Vorgehen ist nach Erstellung des originären Produktionsplans durchzuführen. Bei einer Feinplanung für jeweils eine Woche und einem durch die Automatisierung unterstützten durchschnittlichen Zeitaufwand von 0,5 PT für die Behandlung eines wöchentlichen Plans ergibt sich bei 52 Wochen pro Jahr ein Aufwand von 26 PT/a und damit 22.100 €/a. Dies ergibt einen Personalaufwand für Betriebskosten des Risikomanagementsystems von 25.500 € pro Jahr. Die Kosten sind nachfolgend in Tabelle 4 zusammengefasst.

Tabelle 4: Übersicht über die Aufwände des Systems

Kostenart	Beschreibung	Anzahl	Gesamt
Investitions- und Implementierungs- kosten	Kosten für Softwarelizenz	1	16.500 €
	Kosten für Lizenz für das Risiko- managementsystem		12.800 €
	Aufwand für die Schnittstellen für Auf- trags- und Energiedaten	9 PT	7.650 €
	Aufwand für den Aufbau des System- modells	15 PT	12.750 €
	Summe Investitions- und Implementierungskosten		49.700 €
Betriebskosten	Aufwand für die Risikobeurteilung	8 PT/a	6.800 €/a
	Aufwand für die Risikobehandlung	26 PT/a	22.100 €/a
	Summe Betriebskosten		28.900 €/a

Nutzen

Der Nutzen des Risikomanagementsystems entsteht durch die strukturiert identifizierten und in den Produktionsplan integrierten Maßnahmen zur Reduktion der Eintrittswahrscheinlichkeit und Schadensauswirkung von Risiken. Die Schadensreduktion über geeignete Präventivmaßnahmen und Reaktivmaßnahmen beim Eintreten von Risiken kann anhand einzelner Ereignisse durch Vergleichsrechnungen monetär bewertet werden. Für die Ermittlung des monetären Nutzens werden die in Abschnitt 5.1.3 beschriebenen Ergebnisse aus der Anwendung des Systems herangezogen. Der in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung anzusetzende Nutzen beträgt demnach pro Jahr 42.184 €.

Wirtschaftlichkeit

Die Wirtschaftlichkeit ist stark von der Häufigkeit und der Höhe der monetären Auswirkungen von Risiken abhängig. Aufgrund der kurzen Betrachtungsdauer wird eine statische Betrachtung herangezogen. Das gewählte Beispiel schildert einen repräsentativen Anwendungsfall der energieintensiven Industrie mit einem jährlichen Nutzen von 42.184 € und jährlichen Betriebskosten von 28.900 €. Die jährlichen Rückflüsse als Differenz zwischen risikomanagementinduzierten Kosteneinsparungen und Betriebskosten belaufen sich damit auf 13.284 €/a. Die Investitions- und Implementierungskosten von 49.700 € amortisieren sich damit etwa 3,75 Jahre nach der Einführung des Risikomanagementsystems.

5.2 Erfüllungsgrad der Anforderungen und Reflexion

5.2.1 Erfüllungsgrad der Anforderungen

In diesem Abschnitt wird auf den Erfüllungsgrad der in Abschnitt 4.1 aufgestellten Anforderungen eingegangen. Nachfolgend werden die Einschätzungen zu den einzelnen allgemeinen und spezifischen Anforderungen erläutert.

Allgemeine Anforderungen

- **Transparenz**

Das grundlegende Vorgehen erfolgt nach fest definierten Schritten und klaren Informationsflüssen hinsichtlich erforderlicher Eingangs- und entstehenden Ausgangsdaten. Weiterhin steigern Visualisierungsmöglichkeiten, beispielsweise bei den Strukturmodellen zu Risiken- und Maßnahmen, Auswirkungen auf die Lastgänge oder den Belegungsplänen zu den Stationen die Nachvollziehbarkeit von Ergebnissen und so die Akzeptanz und Praxistauglichkeit des Systems. Vereinzelt Elemente des Risikomanagements wie beispielsweise mehrere aufeinanderfolgende bedingte Wahrscheinlichkeiten sind per se schwer zu erfassen. Hier kann das entwickelte Risikomanagementsystem zwar z.B. mit Visualisierungslösungen unterstützen, jedoch keine vollständige Transparenz ermöglichen.

- **Übertragbarkeit und Skalierbarkeit**

Das einheitliche Systemmodell mit Risikoinventar und Maßnahmenkatalog lässt sich auf vielfältige energieintensive und nicht energieintensive Produktionssysteme übertragen. Die gewählten Ansätze zur Modellierung und Bewertung der Risikobehandlungspfade und deren Auswahl sind allgemein übertragbar, sofern die Anwender in der Lage sind, Eintrittswahrscheinlichkeiten zu parametrisieren die und über die erforderlichen Auftrags-, Energie- und Kostendaten verfügen. Die Methode zur Risikobehandlung ist an analytische Ansätze angelehnt, welche in der Industrie gebräuchlich sind und lässt sich anhand der Zielfunktion und Nebenbedingungen an vielfältige Produktionssysteme und Veränderungen innerhalb dieser Produktionssysteme anpassen. Dies unterliegt der Voraussetzung, dass die Anwender des Systems in der Lage sind, die Gegebenheiten des Produktionssystems mit logischen Zusammenhängen und anhand von Kennzahlen zu beschreiben.

- **Kosten-Nutzen-Verhältnis**

Im Zuge einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung konnten anhand eines repräsentativen Anwendungsfalls die Kosten des Risikomanagementsystems dem Nutzen gegenübergestellt werden. Es zeigt sich, dass der Nutzen durch die vermiedenen Kosten für Auswirkungen von Risiken die Investitions- und Betriebskosten des Systems in einer akzeptablen Zeit amortisieren.

Spezifische Anforderungen

- **Integrierbarkeit in bestehende Systeme**

Das Risikomanagementsystem konnte so konzipiert werden, dass keine bestehenden Systeme substituiert werden, sondern eine Ergänzung an der Schnittstelle zwischen Produktionsplanung und Produktionssteuerung besteht. Bei der Risikobeurteilung werden alle zur Verfügung stehenden Daten, z.B. aus ERP- und Energiemanagementsystem, eingebunden, um möglichst präzise Risikobehandlungspfade zu erstellen.

- **Interaktionsfähigkeit mit Batteriespeichern**

Mittels Publikation P2 wurde gezeigt, dass ein integriertes Scheduling von Aufträgen des Produktionssystems und Energiespeicherbe- und -entladevorgängen aus Sicht der Produktionsplanung mit einfachen mathematischen Modellen durchführbar ist. In Publikation P3 wurde ergänzend die Möglichkeit zur Modellierung der Be- und Entladung eines Batteriespeichers als Maßnahme in den Steckbriefen und bayesschen Netzen aufgenommen und die Ermittlung der Auswirkungen eines Batteriespeichereinsatzes zur Risikobehandlung auf den Lastgang ermittelt (vgl. Abbildung 9 in Publikation P3). Damit ist die grundlegende Integration von Batteriespeichern in das Risikobehandlungssystem gegeben, mit der präventive und reaktive Maßnahmen durch einen Batteriespeicher geplant werden können. Einschränkungen bei der Zielerreichung sind bei der Berücksichtigung von Wechselwirkungen zwischen den eigentlichen kommerziellen Anwendungen des Batteriespeichers und einem vorzuhaltenden Puffer beim Ladestand für das Risikomanagement zu verzeichnen.

- **Berücksichtigung von Wechselwirkungen und Auswirkungen auf logistische und energetische Zielgrößen**

Die mit Publikation P3 eingeführten Risikobehandlungspfade sind dazu geeignet, Risiken und Maßnahmen in energieflexiblen Produktionssystemen mit ihren Wechselwirkungen in Form von z.B. Folgerisiken und Einschränkungen bei weiteren Maßnahmen abzubilden. Bei der Bewertung der mittelbaren und monetären Auswirkungen wurden u.a. durch das Kostenmodell sowohl energetische als auch logistische Kennzahlen vollständig berücksichtigt.

- **Ermöglichung von präventiven und reaktiven Maßnahmen an der Schnittstelle zwischen Produktionsplanung und -steuerung**

Die Risikobeurteilung erfolgt direkt im Anschluss an die Erstellung des Produktionsplans durch die Produktionsplanung. Unter Einbindung der Experten entstehen Risikobehandlungspfade, die wiederum durch subjektive Experteneinschätzungen, aber auch durch objektive, datenbasierte Ansätze priorisiert werden. Durch die anschließende Auswahl von Pfaden und die Integration der enthaltenen Maßnahmen im Rahmen der Risikobehandlung können der Produktionssteuerung ein mittels Präventivmaßnahmen behandelte Produktionsplan bzw. durch Reaktivmaßnahmen ergänzte alternative Produktionspläne zur Verfügung gestellt werden.

- **Automatisierbarkeit der Systeme**

Weite Teile des entwickelten Risikobehandlungssystems sind durch Algorithmen automatisierbar, was zu einer Zeitersparnis und der Vermeidung von Eingabefehlern bei der Anwendung führt. Beispiele hierfür sind die Strukturierung der Risiken und Maßnahmen mittels ISM, die Priorisierung der Risikobehandlungspfade mittels MAUT sowie die Integration der Maßnahmen mittels einer mathematischen Optimierung. Die Entscheidung zu der Umsetzung der vorgeschlagenen Handlungsalternativen obliegt weiterhin bewusst den Experten des Produktionssystems. Jedoch verbleiben einzelne Eingaben, die durch die Anwender manuell erfolgen, z.B. die Parametrisierung der bedingten Wahrscheinlichkeiten der bayesschen Netze.

Tabelle 5 führt abschließend eine Übersicht zum Erfüllungsgrad der aufgestellten Anforderungen auf.

Tabelle 5: Erfüllungsgrad der Anforderungen

Kategorie	Anforderung	Erfüllungsgrad
Allgemein	Transparenz	●
	Übertragbarkeit und Skalierbarkeit	●
	Kosten-Nutzen-Verhältnis	●
Spezifisch	Integrierbarkeit in bestehende Systeme an der Schnittstelle zwischen Produktionsplanung und -steuerung	●
	Interaktionsfähigkeit mit Batteriespeichern	●
	Berücksichtigung von Wechselwirkungen und Auswirkungen auf logistische und energetische Zielgrößen	●
	Ermöglichung von präventiven und reaktiven Maßnahmen	●
	Automatisierbarkeit der Systemelemente	●

Legende: ● erfüllt ● weitestgehend erfüllt

5.2.2 Reflexion

Zusammenfassend konnte das Risikomanagementsystem erfolgreich am Beispiel der Großteilgießerei mit realen Auftrags- und Energiedaten angewendet werden. So wurde gezeigt, dass es für den Einsatz in der industriellen Praxis grundsätzlich geeignet ist.

Die einbezogene Publikation P1 erweitert den Stand der Forschung um ein Systemmodell an der Schnittstelle zwischen Produktionsplanung und Produktionssteuerung, das es ermöglicht, präventive und reaktive Maßnahmen zur Risikobehandlung einzubeziehen. Der Aufbau des Systemmodells ist stark abhängig vom vorliegenden Produktionssystem und dem Reifegrad der Energieflexibilität bei der Planung und Steuerung von Aufträgen. Sofern dieser fortgeschritten ist, sind Risiken durch Erfahrungen aus dem operativen Betrieb bekannt und es können Maßnahmen für die Risikobehandlung aus den bekannten Energieflexibilitätsmaßnahmen abgeleitet werden. Befindet sich die Einführung von Zielgrößen und Einflussgrößen der Energieflexibilität im Aufbau, kann der parallele Aufbau des Systems für das Risikomanagement herausfordernd sein.

Batteriespeichersysteme werden im Rahmen des Systemmodells durch Publikation P2 berücksichtigt und können so Maßnahmen, die sich aus Produktionsanlagen ableiten, sinnvoll ergänzen. Die bestehende Literatur wurde um einen Ansatz zur Planung der Be- und Entladung von Batteriespeichern im Rahmen der Auftragsplanung der PPS erweitert. Ähnlich wie Batteriespeicher können auch Anlagen der technischen Gebäudeausrüstung (TGA) die Energieflexibilität eines Produktionssystems erweitern. So kann beispielsweise die Verschiebung der Anschlagzeitpunkte von Lüftungsanlagen oder Druckluftkompressoren in den Katalog der Risikobehandlungsmaßnahmen aufgenommen werden. Die damit einhergehenden Anforderungen, Wechselwirkungen und Potenziale sind zwar grundsätzlich über das Systemmodell abbildbar, wurden im Rahmen der Arbeit jedoch nicht spezifisch betrachtet.

Die Risikobeurteilung im Rahmen von Publikation P3 fußt auf der Modellierung von Einzelenen und deren Wechselwirkungen. Der Stand der Forschung wurde durch eine Methode zur Entwicklung von Risikobehandlungspfaden erweitert, welche alle in einem Produktionssystem bekannten Risiken und Maßnahmen mit deren Wechselwirkungen und bedingten Wahrscheinlichkeiten abbilden können. Die Methode war bei der Anwendung für die Experten insgesamt gut nachvollziehbar. Die Beurteilung bedingter Wahrscheinlichkeiten stellt sich jedoch durch die Verwendung der bayesschen Netze abstrakt dar. Hier konnte die Visualisierung des entstandenen Strukturmodells unterstützen. Herausfordernd stellte sich die manuelle Parametrisierung der bedingten Wahrscheinlichkeiten durch die Experten des Produktionssystems dar, da sie ihre subjektiven Einschätzungen in Form eines konkreten Wertes in Prozent ausdrücken mussten. Hier können datenbasierte Ansätze zur Analyse der Produktionsdaten zukünftig unterstützen, indem sie Werte vorschlagen, die durch die Experten angepasst werden können.

Die durch Publikation P4 beschriebene Risikobehandlung erweitert den bisherigen Stand der Forschung zum einen um ein multikriterielles Verfahren zur Auswahl einer Risikobehandlungsstrategie unter Berücksichtigung der objektiven und subjektiven Risikopräferenz der Entscheider. Zum anderen können die gewählten präventiven und reaktiven Maßnahmen über eine automatisierbare Methode in den bestehenden Produktionsplan integriert werden, sodass als Ergebnis ein risikobehandelter Produktionsplan bzw. Reaktionspläne für Risiken vorliegen. Der paarweise Vergleich zur subjektiven Gewichtung der Trilemmakriterien war für die Anwender gut nachvollziehbar, die Möglichkeit diese individuell für einzelne Fertigungszeiträume oder Kundenaufträge zuzuordnen begünstigt die wechselnden Anforderungen, insbesondere zwischen dem Bedarf an Risikoreduktion und den dafür in Kauf genommenen Kosten. Die Entstehung der Ergebnisse zur objektiven Gewichtung der Trilemmakriterien anhand der Entropie und Nutzenfunktionen war im Anwendungsfall schwer zu vermitteln. Es sollte darauf geachtet werden, die Abweichungen zur subjektiven Gewichtung durch die Anwender zu verdeutlichen, um Transparenz hinsichtlich der gemittelten Ergebnisse aus subjektiver und objektiver Gewichtung zu schaffen und so Korrekturen an zu stark subjektive Einschätzungen zu ermöglichen. Nach der Priorisierung der Risikobehandlungspfade entscheiden sich die Anwender manuell für bestimmte Pfade, deren Maßnahmen in den Produktionsplan zu integrieren sind. Durch die entwickelte GUI war es gut möglich, eine Vielzahl an hoch priorisierten Pfaden zu betrachten und die relevantesten Pfade auszuwählen, jedoch fehlte ein strukturiertes Vorgehen, um zu vermeiden, dass wichtige Pfade dennoch übersehen werden. Bei der anschließenden Integration von Maßnahmen war es plausibel, mit der Zielfunktion der mathematischen Optimierung, nicht wie bei der Planung üblich, die Strompreisprognosen einzubeziehen, sondern stattdessen Prognosen für die Höhe der Pönalen für Abweichungen von der beschafften elektrischen Energie heranzuziehen. Es ist jedoch herausfordernd, Zeitreihen in Form von Prognosedaten für zukünftige Zeiträume zu erstellen, oder zu beziehen. Ansatzpunkte geben die auch für diese Arbeit herangezogenen reBAP oder Prognosen für den Intraday-Markt, da im Wesentlichen keine exakten Prognosen für einzelne Zeitabschnitte benötigt werden, sondern Zeiträume mit besonders hohen oder tiefen erwarteten Pönalen für das Scheduling zu berücksichtigen sind.

6 Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Zusammenfassung

Die vorliegende kumulative Dissertation präsentiert anhand von vier Publikationen ein Risikomanagementsystem für die energieorientierte PPS. Die energieorientierte PPS ermöglicht die Erwirkung von Kosteneinsparungen durch die Berücksichtigung von energetischen Eingangs- und Zielgrößen, beispielsweise in Form einer Anpassung des Stromverbrauchs an volatile Strompreise oder durch die Vermeidung von Lastspitzen zur Reduktion von Netzentgelten. Damit erhöht sich jedoch die ohnehin hohe Komplexität der Aufgaben der PPS und es gilt erweiterte Risikoursachen und -auswirkungen zu beachten. Das entwickelte Risikomanagementsystem stellt mit der Modellierung von Risiken und Maßnahmen im Rahmen der Risikobeurteilung sowie einer Methode zur Risikobehandlung derart sicher, dass unerwartete Ereignisse zuverlässig bewertet und geeignete präventive und reaktive Maßnahmen zu deren Behandlung implementiert werden können. Im Gegensatz zu situativen Ansätzen können so unerwartete Ereignisse hinsichtlich ihrer Auswirkungen und Wechselwirkungen ohne Zeitdruck eingeschätzt werden. Auch die Entscheidung für Maßnahmen erfolgt weit vor dem Eintreten der Ereignisse und ermöglicht so die Abwägung vielfältiger, teils konkurrierender Zielgrößen zur Auswahl optimaler Maßnahmen und Maßnahmenkombinationen.

Dabei ist das System als Ergänzung zu den bei vielen Unternehmen bereits etablierten Systemen der PPS ausgestaltet und bietet die Möglichkeit für eine Teilautomatisierung der Vorgänge, um die Akzeptanz zur Anwendung des Risikomanagementsystems zu erhöhen. Es bietet einen Beitrag zur zuverlässigen Planung und Steuerung energieflexibler Produktionssysteme, welche nicht nur entscheidend für die Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen ist, sondern auch einen wichtigen Baustein für die Integration von erneuerbaren Energien darstellt. Damit wird die Energiewende unterstützt, welche wiederum eine nachhaltige Energieversorgung der Gesellschaft verfolgt und in der Folge einen Beitrag zur Erreichung der Klimaziele leistet.

6.2 Ausblick

Im Rahmen der Arbeiten konnte mit der Entwicklung eines Risikomanagementsystems für die energieorientierte PPS die in Abschnitt 1.2 aufgestellte Zielsetzung erreicht werden. Es wurden alle damit verbundenen Forschungsfragen behandelt und die in Abschnitt 4.1 abgeleiteten Anforderungen an das System erfüllt. Dennoch lässt sich das System in folgenden Arbeiten verbessern und weiterentwickeln. Die folgenden Aspekte bieten hierzu Ansatzpunkte:

- Die Identifikation von Risiken und Maßnahmen sowie die Bewertung derer Eigenschaften für Risikoinventar und Maßnahmenkatalog, basiert auf gängigen Kreativtechniken und der Einbindung von Experteneinschätzungen. Im Zuge einer zunehmenden digitalen Abbildung von Produktionssystemen mittels digitaler Zwillinge

und vermehrter Integration von Sensorik besteht ein hohes Potenzial, die Identifikation und Bewertung z.B. mit Hilfe von Data Mining Ansätzen zu unterstützen.

- Der Umgang mit Wahrscheinlichkeiten und insbesondere mit bedingten Wahrscheinlichkeiten ist für Anwender häufig schwer nachzuvollziehen. Um Verbesserungen bei der Transparenz und so der Akzeptanz des Systems zu bewirken, sollte die Erklärbarkeit der Modelle unterstützt und eine Einordnung der Ergebnisse durchgeführt werden. Ansätze sind hierzu z.B. interpretierbare Modellinformationen und Sensitivitätsanalysen zu den Auswirkungen von Abweichungen bei den Ergebnissen.
- Nach deren Priorisierung erfolgt die Auswahl der Risikobehandlungspfade manuell. Hier können regelbasierte Ansätze unterstützen, beispielsweise mit Vorgaben zu einer bestimmten Anzahl an enthaltenen Risiken auf den gewählten Pfaden.
- Geeignete Messkonzepte vorausgesetzt, stehen nach dem Durchführen der Reaktivmaßnahmen Daten zu deren Auswirkungen zur Verfügung. Diese können einerseits genutzt werden, um die Modellierung der Risiken und Maßnahmen zu verbessern und andererseits, um die bedingten Wahrscheinlichkeiten der bayesschen Netze datenbasiert zu parametrisieren statt wie bisher manuell durch die Anwender.
- Das entwickelte System berücksichtigt bereits Batteriespeicher zur Erweiterung der Handlungsoptionen bei der Risikobehandlung. Da sich die Energieinfrastruktur der produzierenden Unternehmen mit deren Anlagenparks in den letzten Jahren stark erweiterte und diversifizierte, sollten im Sinne eines ganzheitlichen Ansatzes in zukünftigen Weiterentwicklungen auch die Spezifika von z.B. regelbaren Eigenerzeugungsanlagen, Ladesäulen, Brennstoffzellen und flexiblen Anlagen der TGA einbezogen werden.

Literaturverzeichnis

ABELE ET AL. 2020

Abele, M.; Unterberger, E.; Friedl, T.; Carda, S.; Roth, S.; Hohmann, A.; Reinhart, G.: Simulation-based evaluation of an energy oriented production planning system. *Procedia CIRP* 88 (2020), S. 246-251.

ABELE & REINHART 2011

Abele, E.; Reinhart, G.: *Zukunft der Produktion. Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen*. München: Hanser, Carl 2011. ISBN: 978-3-446-42595-8.

ALINEZHAD & KHALILI 2019

Alinezhad, A.; Khalili, J.: *New methods and applications in multiple attribute decision making (MADM)*. Cham, Switzerland: Springer 2019. ISBN: 978-3-030-15009-9. (International series in operations research & management science volume 277).

AMORIM ET AL. 2013

Amorim, P.; Alem, D.; Almada-Lobo, B.: Risk Management in Production Planning of Perishable Goods. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 52 (2013) 49, S. 17538-17553.

ARUNRAJ & MAITI 2010

Arunraj, N. S.; Maiti, J.: Risk-based maintenance policy selection using AHP and goal programming. *Safety Science* 48 (2010) 2, S. 238-247.

AUSFELDER ET AL. 2018

Ausfelder, F.; Seitz, A.; von Roon, S.: *Flexibilitätsoptionen in der Grundstoffindustrie. Methodik | Potenziale | Hemmnisse*. 2018.

BANK ET AL. 2019

Bank, L.; Rösch, M.; Unterberger, E.; Roth, S.; Rohrer, A.; Köberlein, J.; Braunreuther, S.; Schilp, J.: Comparison of Simulation-based and Optimization-based Energy Flexible Production Planning. *Procedia CIRP* 81 (2019), S. 294-299.

BAUMHÖGGER & PERRET 2017

Baumhögger, J.; Perret, C.: Großhandelsmärkte für Strom und Gas. In: Matzen, F. et al. (Hrsg.): *Industrielle Energiestrategie. Praxishandbuch für Entscheider des produzierenden Gewerbes* 2017, S. 75-98.

BEIER ET AL. 2016

Beier, J.; Neef, B.; Thiede, S.; Herrmann, C.; Herrmann, C.: Integrating on-site renewable electricity generation into a manufacturing system with intermittent battery storage form electric vehicles // Integrating on-site Renewable Electricity Generation into a Manufacturing System with Intermittent Battery Storage from Electric Vehicles. *Procedia CIRP* 48 (2016), S. 483-488.

BETZ & LIENKAMP 2016

Betz, J.; Lienkamp, M.: Approach for the development of a method for the integration

of battery electric vehicles in commercial companies, including intelligent management systems. *Automotive and Engine Technology* 1 (2016) 1-4, S. 107-117.

BHOLE 2018

Bhole, G. P.: Multi Criteria Decision Making (MCDM) Methods and its applications. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology* 6 (2018) 5, S. 899-915.

BLEICHER 2004

Bleicher, K.: *Das Konzept integriertes Management. Visionen - Missionen - Programme.* 7., überarb. und erw. Aufl. Frankfurt/Main: Campus Verlag 2004. ISBN: 3593376342. (St Galler Management-Konzept Bd. 1).

BLESSING & CHAKRABARTI 2009

Blessing, L. T.; Chakrabarti, A.: *DRM, a design research methodology.* London: Springer 2009. ISBN: 978-1-84882-586-4.

BOLLIG 2019

Bollig, T.: *Simulation und Optimierung einer Gießereiproduktion unter energetischen Gesichtspunkten.* (Masterarbeit) RWTH Aachen. Aachen (2019).

BRANDA ET AL. 2016

Branda, M.; Novotný, J.; Olstad, A.: Fixed interval scheduling under uncertainty – A tabu search algorithm for an extended robust coloring formulation. *Computers & Industrial Engineering* 93 (2016), S. 45-54.

BRASSEUR & JACOB 2017

Brasseur, Guy; Jacob, Daniela (Hrsg.): *Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven.* [1. Aufl.]. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum 2017. ISBN: 3662503964.

BRÜHWILER 1980

Brühwiler, B.: *Risk Management als Aufgabe der Unternehmensführung.* Bern: P. Haupt 1980. ISBN: 9783258029726.

BUHL ET AL. 2021

Buhl, H. U.; Gabrek, N.; Gerdes, J.-N.; Kaymakci, C.; Rauland, K.; Richter, F.; Sauer, A.; Schneider, C.; Schott, P.; Seifermann, S.; Tristán, A.; Wagner, J.; Wagon, F.; Weibelzahl, M.; Weissflog, J.; Zachmann, B.: *Industrial flexibility options and their applications in a future energy system.* White paper.

BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND NUKLEARE SICHERHEIT 2021: *Lesefassung des Bundes-Klimaschutzgesetzes 2021 mit markierten Änderungen zur Fassung von 2019.* Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. 2021.

BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND KLIMASCHUTZ 2022

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz: *Erneuerbare Energien in Zahlen.* 2022.

DAULTANI ET AL. 2019

Daultani, Y.; Goswami, M.; Vaidya, O. S.; Kumar, S.: Inclusive risk modeling for manufacturing firms: a Bayesian network approach. *Journal of Intelligent Manufacturing* 30 (2019) 8, S. 2789-2803.

DESTATIS 2021

Statistisches Bundesamt (Destatis): Datenreport 2021, Kapitel 13: Umwelt, Energie und Mobilität. 2021.

DEUTSCHER INDUSTRIE- UND HANDELSKAMMERTAG E. V. 2018

Deutscher Industrie- und Handelskammertag e. V.: Eigenerzeugung, Eigenversorgung, Mieterstrom und Stromdirektlieferung. 2018.

DEUTSCHER INDUSTRIE- UND HANDELSKAMMERTAG E. V. 2021

Deutscher Industrie- und Handelskammertag e. V.: Energiewende-Barometer 2021 der IHK Organisation – Unternehmensumfrage zur Umsetzung der Energiewende. 2021.

DIEDERICHS 2013

Diederichs, M.: Risikomanagement und Risikocontrolling. 3rd ed. München: Franz Vahlen 2013. ISBN: 978-3-80064-222-9. (Finance Competence).

DIN EN 60812 2006

DIN EN 60812: Analysetechniken für die Funktionsfähigkeit von Systemen – Verfahren für die Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse (FMEA). Berlin: Beuth Verlag 2006.

DIN EN 61025-08 2007

DIN EN 61025-08: Fehlzustandsbaumanalyse. Berlin: Beuth Verlag 2007.

DIN ISO 31000 2018

DIN ISO 31000: Risikomanagement - Leitlinien. Berlin: Beuth Verlag 2018.

DOCZY & ABDELRAZIG 2017

Doczy, R.; AbdelRazig, Y.: Green Buildings Case Study Analysis Using AHP and MAUT in Sustainability and Costs. *Journal of Architectural Engineering* 23 (2017) 3, S. 5017002.

DUFTER ET AL. 2017

Dufter, C.; Guminski, A.; Orthofer, C.; von Roon, S.; Gruber, A.: Lastflexibilisierung in der Industrie – Metastudienanalyse zur Identifikation relevanter Aspekte bei der Potenzialermittlung. 10. Internationale Energiewirtschaftstagung an der TU Wien IEWT 2017 (2017).

EISELBRECHER 2020

Eiselbrecher, K. R.: Strategisches Risikomanagement Für Verteilnetzbetreiber Im Liberalisierten Energiemarkt. Theorie und Praktische Implikationen. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2020. ISBN: 978-3-658-31613-6.

EVERS 2002

Evers, K.: Simulationsgestützte Belegungsplanung in der Multiressourcen-Montage: Hannover : Universität 2002.

EVERSHEIM 1992

Eversheim, W.: Störungsmanagement in der Montage. Erfolgreiche Einzel- und Kleinserienproduktion. Düsseldorf: VDI-Verl. 1992. ISBN: 3184012522.

FAN ET AL. 2020

Fan, Y.; Huang, K.; Huang, G. H.; Li, Y. P.: A factorial Bayesian copula framework for partitioning uncertainties in multivariate risk inference. Environmental research 183 (2020), S. 109215.

FEIZI ET AL. 2017

Feizi, F.; Karbalaee-Ramezani, A.; Tusi, H.: Mineral Potential Mapping Via TOPSIS with Hybrid AHP–Shannon Entropy Weighting of Evidence: A Case Study for Porphyry-Cu, Farmahin Area, Markazi Province, Iran. Natural Resources Research 26 (2017) 4, S. 553-570.

FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR ENERGIEWIRTSCHAFT 2023

Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft: Deutsche Strompreise im Jahr 2022 an der Börse EPEX Spot. <<https://www.ffe.de/veroeffentlichungen/deutsche-strompreise-an-der-boerse-epex-spot-im-jahr-2022/#:~:text=Deutscher%20Base%20Strompreis%20steigt%20im,2021%20gegen%C3%BCber%202020%20verdreifacht%20hat-ten.>> - 25.01.2023.

FRANTZÉN ET AL. 2011

Frantzén, M.; Ng, A. H.; Moore, P.: A simulation-based scheduling system for real-time optimization and decision making support. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 27 (2011) 4, S. 696-705.

GEBHARD 2009

Gebhard, M.: Hierarchische Produktionsplanung bei Unsicherheit. Wiesbaden: Gabler 2009. ISBN: 978-3-8349-1677-8. (Gabler Edition Wissenschaft. Produktion und Logistik).

GENC 2015

Genc, E.: Frühwarnsystem für ein adaptives Störungsmanagement. (Dissertation) Technische Universität München (2015).

GLEIBNER & WOLFRUM 2019

Gleißner, W.; Wolfrum, M.: Risikoaggregation und Monte-Carlo-Simulation: Springer Fachmedien Wiesbaden 2019. ISBN: 978-3-658-24273-2.

GRABL 2015

Graßl, M.: Bewertung der Energieflexibilität in der Produktion. (Dissertation) Technische Universität München (2015).

HACKSTEIN 1989

Hackstein, R.: Produktionsplanung und -steuerung (PPS). Ein Handbuch für die Betriebspraxis. 2., überarb. Aufl. Düsseldorf: VDI-Verl. 1989. ISBN: 3-18-400924-6.

HANFELD 2021

Hanfeld, M.: Energiebeschaffungsmodelle und Energiemarktrisiken in der Produktionsplanung und -steuerung. In: Claus, T. et al. (Hrsg.): Produktionsplanung und -steuerung. Forschungsansätze, Methoden und Anwendungen. 2nd ed. 2021 Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; Imprint Springer Gabler 2021, S. 299-320. ISBN: 978-3-662-64290-0. (Springer eBook Collection).

HÄRTERICH 1987

Härterich, S.: Risk Management von industriellen Produktions- und Produktrisiken. Universität Mannheim (1987).

HEIN 2007

Hein, D.: Strategisches Risikomanagement im Maschinen- und Anlagenbau. 1. Auflage. Aachen: Shaker 2007. ISBN: 978-3-8322-6733-9. (Berichte aus der Produktionstechnik 2007/29).

HEINECKE 2013

Heinecke, G.: Resilient Automotive Production in Vulnerable Supply Networks: A Supply Chain Event Management System. (Dissertation)ETH Zürich. Zürich (2013).

HEUCK 2013

Heuck, K.: Elektrische Energieversorgung. Erzeugung, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie für Studium und Praxis. 9., aktualisierte u. korr. Aufl. 2013. Wiesbaden: Springer Vieweg 2013. ISBN: 978-3-8348-1699-3. (Springer eBook Collection Computer Science and Engineering).

HOLT & LAURY 2002

Holt, C.; Laury, S.: Risk Aversion and Incentive Effects. American Economic Review 95 (2002) 5, S. 1644-1655.

HOLTTINEN 2012

Holttinen, H.: Wind integration: experience, issues, and challenges. Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment 1 (2012) 3, S. 243-255.

HU & HU 2016

Hu, Z.; Hu, G.: A two-stage stochastic programming model for lot-sizing and scheduling under uncertainty. International Journal of Production Economics 180 (2016), S. 198-207.

HUBER 2021

Huber, M.: Auswahl und Integration von präventiven und reaktiven Maßnahmen zur Risikobehandlung in der energieorientierten Produktionsplanung. (Masterarbeit)Technische Universität München. München (2021).

HUND 2018

Hund, M.: Entwicklung einer simulationsgestützten Methode zur energiebezugsorientierten Produktionsplanung mit Lastverlaufsprognose im Schmelzbetrieb einer Eisen-Gießerei. (Masterarbeit) Technische Universität München. München (2018).

HUNZIKER & BALMER 2018

Hunziker, S.; Balmer, P.: Enterprise Risk Management in Schweizer Unternehmen. In: Hunziker, S. (Hrsg.): Ganzheitliches Chancen- und Risikomanagement: Springer Fachmedien Wiesbaden 2018, S. 89-111. ISBN: 978-3-658-17723-2.

ILANGKUMARAN & KUMANAN 2009

Ilangkumaran, M.; Kumanan, S.: Selection of maintenance policy for textile industry using hybrid multi - criteria decision making approach. *Journal of Manufacturing Technology Management* 20 (2009) 7, S. 1009-1022.

ISHIZAKA & NEMERY 2013

Ishizaka, A.; Nemery, P.: Multi-criteria decision analysis. Methods and software. Chichester: Wiley 2013. ISBN: 978-1-119-97407-9.

ISO 9000:2005 2005

ISO 9000:2005: Qualitätsmanagementsysteme – Grundlagen und Begriffe, Dreisprachige Fassung EN ISO 9000:2005 (2005).

KALCHSCHMID 2020

Kalchschmid, V.: Kostenbewertung von Produktionsrisiken und Kompensationsmaßnahmen in energieflexiblen Produktionssystemen. (Masterarbeit) Hochschule Kempten (2020).

KALCHSCHMID ET AL. 2021

Kalchschmid, V.; Hartmann, C.; Angerer, K.; Roth, S.; Rösch, M.; Hohmann, A.; Günther, D.; Volk, W.: WindMelt – Ökonomische und ökologische Betrachtung der Direktnutzung von Windstrom zum Schmelzen von Aluminium. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 116 (2021) 12, S. 922-930.

KELLER ET AL. 2016

Keller, F.; Schultz, C.; Braunreuther, S.; Reinhart, G.: Enabling Energy-Flexibility of Manufacturing Systems through New Approaches within Production Planning and Control. *Procedia CIRP* 57 (2016), S. 752-757.

KELLER 2018

Keller, F.: Methodik zur energiebezugsorientierten Auftragsplanung. (Dissertation) Technische Universität München (2018).

KHEMIRI ET AL. 2017

Khemiri, R.; Elbedoui-Maktouf, K.; Grabot, B.; Zouari, B.: A fuzzy multi-criteria decision-making approach for managing performance and risk in integrated procurement-production planning. *International Journal of Production Research* 55 (2017) 18, S. 5305-5329.

KLÖBER-KOCH ET AL. 2018

Klöber-Koch, J.; Braunreuther, S.; Reinhart, G.: Approach For Risk Identifikation And Assessment In A Manufacturing System. (Hrsg.): *Procedia CIRP* 72 2018, S. 683-688.

KLÖBER-KOCH 2021

Klöber-Koch, J.: System zur operativen Produktionsplanung unter Berücksichtigung der Risikopräferenz. (Dissertation) Technische Universität München. München (2021).

KÖNIG 2008

König, R.: Management betrieblicher Risiken bei produzierenden Unternehmen. (Dissertation) RWTH Aachen. Aachen (2008).

KONSTANTIN 2017

Konstantin, P.: Praxisbuch Energiewirtschaft. Energieumwandlung, -transport und -beschaffung, Übertragungsnetzausbau und Kernenergieausstieg. Springer-Verlag GmbH. 4., aktualisierte Auflage. Berlin: Springer Vieweg 2017. ISBN: 978-3-662-49822-4. (VDI-Buch).

KREBS 2012

Krebs, P.: Bewertung vernetzter Produktionsstandorte unter Berücksichtigung multidimensionaler Unsicherheiten. (Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 2011). München: Utz 2012. ISBN: 978-3-8316-4156-7. (Forschungsberichte 255).

LAUX ET AL. 2018

Laux, H.; Gillenkirch, R. M.; Schenk-Mathes, H. Y.: Entscheidungstheorie. 10. Aufl. 2018. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2018. ISBN: 978-3-662-57817-9.

LINDEMANN 2007

Lindemann, U.: Methodische Entwicklung technischer Produkte. Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden. 2., bearbeitete Auflage. Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2007. ISBN: 978-3-540-37451-0. (VDI-Buch).

LÖDDING 2016

Lödding, H.: Verfahren der Fertigungssteuerung. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2016. ISBN: 978-3-662-48458-6.

LÖDDING ET AL. 2019

Lödding, H.; Mundt, C.; Winter, M.; Heuer, T.; Hübner, M.; Seitz, M.; Schmidhuber, M.; Maibaum, J.; Bank, L.; Roth, S.; Scherwitz, P.; Theumer, P.: PPS-Report 2019 – Studienergebnisse: TEWISS-Technik und Wissen GmbH 2019. ISBN: 978-3-95900-402-2.

LUND ET AL. 2015

Lund, P. D.; Lindgren, J.; Mikkola, J.; Salpakari, J.: Review of energy system flexibility measures to enable high levels of variable renewable electricity. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 45 (2015), S. 785-807.

MALONE 1975

Malone, D. W.: An introduction to the application of interpretive structural modeling. *Proceedings of the IEEE* 63 (1975) 3, S. 397-404.

MARCZINSKI 2008

Marczinski, G.: Einsatzgebiete von ERP-, APS- und MES-Lösungen. ERP-Management (2008) 4, S. 62-64.

MATHWORKS 2018a

MathWorks: MATLAB App Designer. <<https://de.mathworks.com/products/matlab/app-designer.html>> - 20.01.2023.

MATHWORKS 2018b

MathWorks: MATLAB Version 9.5.0.944444 (R2018b).
<<https://de.mathworks.com/products/matlab.html>> - 20.01.2023.

MATHWORKS 2019

MathWorks: MATLAB Version 9.5.0.9.6.0.1472908 (R2019a).
<<https://de.mathworks.com/products/matlab.html>> - 20.01.2023.

MATZEN & TESCH 2017

Matzen, Frank; Tesch, Ralf (Hrsg.): Industrielle Energiestrategie. Praxishandbuch für Entscheider des produzierenden Gewerbes. 2017.

MAURER 2016

Maurer, S.: Frühaufklärung kritischer Situationen in Versorgungsprozessen. München: Herbert Utz Verlag 2016. ISBN: 978-3-8316-4554-1. (Iwb-Forschungsberichte Band 316).

MAYER ET AL. 2016

Mayer, J.; Pielmeier, J.; Berger, C.; Engehausen, F.; Hempel, T.; Hünnekes, P.: Aktuellen Herausforderungen der Produktionsplanung und -steuerung mittels Industrie 4.0 begegnen. Erstausgabe, neue Ausgabe. Garbsen: TEWISS 2016. ISBN: 978-3-95900-104-5. (Berichte aus dem IFA).

MERZ 2011

Merz, M.: Entwicklung einer indikatorenbasierten Methodik zur Vulnerabilitätsanalyse für die Bewertung von Risiken in der industriellen Produktion. (Dissertation)Karlsruher Institut für Technologie KIT. Karlsruhe (2011).

MIRSCHER 2007

Mirschel, S.: Messung und Bewertung von Produktionsflexibilitätpotentialen in geschlossenen und offenen Entscheidungsfeldern. Berlin: Logos-Verl. 2007. ISBN: 9783832514679. (Schriften zum Konvergenzmanagement Bd. 7).

MÜLLER ET AL. 2009

Müller, E.; Engelmann, J.; Löffler, T.; Strauch, J.: Energieeffiziente Fabriken planen und betreiben. Berlin: Springer 2009. ISBN: 978-3-540-89643-2.

MUQIMUDDIN & SINGGIH 2020

Muqimuddin; Singgih, M. L.: Integrated FMEA-MCDM For Prioritizing Operational Disruption in Production Process. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 847 (2020) 1, S. 12028.

NEUGEBAUER 2013

Neugebauer, Reimund (Hrsg.): Handbuch Ressourcenorientierte Produktion. München: Carl Hanser Verlag 2013. ISBN: 978-3-446-43008-2.

NOTTMEYER 2008

Nottmeyer, J.: Entwicklung eines Verfahrens zur Bestimmung operativer organisatorischer Risiken in Gießereien. (Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2008). Aachen: Shaker 2008. ISBN: 978-3-8322-7553-2. (Schriftenreihe Rationalisierung und Humanisierung 90).

NYHUIS ET AL. 2008

Nyhuis, P.; Reinhart, G.; Abele, E.: Wandlungsfähige Produktionssysteme. Heute die Industrie von morgen gestalten. Garbsen: PZH Produktionstechnisches Zentrum 2008. ISBN: 978-3-939026-96-9.

OEHLER & UNSER 2002

Oehler, A.; Unser, M.: Finanzwirtschaftliches Risikomanagement. Zweite, verbesserte Auflage. Berlin, Heidelberg, s.l.: Springer Berlin Heidelberg 2002. ISBN: 978-3-540-43251-7. (Springer-Lehrbuch).

OEHMEN ET AL. 2009

Oehmen, J.; Ziegenbein, A.; Alard, R.; Schönsleben, P.: System-oriented supply chain risk management. *Production Planning & Control* 20 (2009) 4, S. 343-361.

OSTGATHE 2012

Ostgathe, M.: System zur produktbasierten Steuerung von Abläufen in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage. (Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 2012). München: Utz 2012. ISBN: 978-3-8316-4206-9. (Forschungsberichte IWB 265).

PALENSKY & DIETRICH 2011

Palensky, P.; Dietrich, D.: Demand Side Management: Demand Response, Intelligent Energy Systems, and Smart Loads. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 7 (2011) 3, S. 381-388.

PAN ET AL. 2019

Pan, Y.; Ou, S.; Zhang, L.; Zhang, W.; Wu, X.; Li, H.: Modeling risks in dependent systems: A Copula-Bayesian approach. *Reliability Engineering & System Safety* 188 (2019), S. 416-431.

PEREIRA ET AL. 2016

Pereira, J. C.; Fragoso, M. D.; Todorov, M. G.: Risk Assessment using Bayesian Belief Networks and Analytic Hierarchy Process applicable to Jet Engine High Pressure Turbine Assembly. *IFAC-PapersOnLine* 49 (2016) 12, S. 133-138.

PFOHL ET AL. 2011

Pfohl, H.-C.; Gallus, P.; Thomas, D.: Interpretive structural modeling of supply chain risks. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* 41 (2011) 9, S. 839-859.

PHILIPP ET AL. 2022

Philipp, M.; Collath, N.; Roth, S.; Theumer, P.; Will-Ehlers, G.; Kellermann, M.; Hesse, H.: Batteriespeicherlösungen zur energiewirtschaftlichen Optimierung von Industriebetrieben. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 117 (2022) 5, S. 305-311.

PIELMEIER 2019

Pielmeier, J.: System zur ereignisorientierten Produktionssteuerung. (Dissertation) Technische Universität München. München (2019).

PINEDO 2016

Pinedo, M.: Scheduling. Theory, algorithms, and systems. Fifth Edition. Cham, Heidelberg, New York, Dordrecht, London: Springer 2016. ISBN: 978-3-319-26580-3.

POSCH 2011

Posch, W.: Ganzheitliches Energiemanagement für Industriebetriebe. Wiesbaden: Gabler 2011. ISBN: 978-3-8349-2585-5. (SpringerLink Bücher).

QAZI & AKHTAR 2020

Qazi, A.; Akhtar, P.: Risk matrix driven supply chain risk management: Adapting risk matrix based tools to modelling interdependent risks and risk appetite. Computers & Industrial Engineering 139 (2020).

RAGER 2008

Rager, M.: Energieorientierte Produktionsplanung. (Dissertation) Universität Augsburg. Augsburg (2008).

REINHART & GRABL 2012

Reinhart, G.; Graßl, M.: Bewertung der Energieflexibilität von Produktionssystemen. wt Werkstattstechnik online 102 (2012) 9, S. 622-628.

ROGLER 2002

Rogler, S.: Risikomanagement im Industriebetrieb. Analyse von Beschaffungs-, Produktions- und Absatzrisiken: Deutscher Universitätsverlag 2002.

RÖSCH 2021

Rösch, M.: System zur energieorientierten und kostenbasierten Produktionssteuerung mittels Reinforcement Learning. (Dissertation) Technische Universität München. München (2021).

ROTH ET AL. 2018

Roth, S.; Klement, T.; Braunreuther, S.; Reinhart, G.: Vehicle-to-Factory. Eine Potenzialanalyse zur Nutzung der Speicher von Elektromobilen im industriellen Umfeld. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 113 (2018) 9, S. 565-570.

ROTH ET AL. 2020a

Roth, S.; Stumpe, L.; Schmiegel, B.; Braunreuther, S.; Schilp, J.: An optimization-based approach for the planning of energy flexible production processes with integrated energy storage scheduling. Procedia CIRP 88 (2020) 9, S. 258-264.

ROTH ET AL. 2020b

Roth, S.; Weber, M.; Hohmann, A.; Reinhart, G.: Risk Assessment and Treatment Planning for Energy-flexible Production Systems Using an Additional Cost Model. 2020 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management IEEM (2020), S. 85-90.

ROTH ET AL. 2020c

Roth, S.; Schott, P.; Ebinger, K.; Halbrügge, S.; Kleinertz, B.; Köberlein, J.; Püschel, D.; Buhl, H. U.; Ober, S.; Reinhart, G.; Roon, S. von: The Challenges and Opportunities of Energy-Flexible Factories: A Holistic Case Study of the Model Region Augsburg in Germany. Sustainability 12 (2020) 1, S. 360.

ROTH ET AL. 2021

Roth, S.; Kalchschmid, V.; Reinhart, G.: Development and evaluation of risk treatment paths within energy-oriented production planning and control. Production Engineering 15 (2021) 3-4, S. 413-430.

ROTH ET AL. 2022

Roth, S.; Huber, M.; Schilp, J.; Reinhart, G.: Risk Treatment for Energy-Oriented Production Plans through the Selection, Classification, and Integration of Suitable Measures. Applied Sciences 12 (2022) 13, S. 6410.

ROTH & REINHART 2019

Roth, S.; Reinhart, G.: Risikomanagement in der energieorientierten Produktionsplanung und -steuerung. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 114 (2019) 12, S. 823-827.

SAATY 1984

Saaty, T. L.: The Analytic Hierarchy Process: Decision Making in Complex Environments (1984), S. 285-308.

SAATY 1990

Saaty, T. L.: How to make a decision: The analytic hierarchy process. European Journal of Operational Research 48 (1990) 1, S. 9-26.

ŞAHİN 2020

Şahin, M.: A comprehensive analysis of weighting and multicriteria methods in the context of sustainable energy. International journal of environmental science and technology : IJEST (2020), S. 1-26.

SALAHİ & JAFARI 2016

Salahi, N.; Jafari, M. A.: Energy-Performance as a driver for optimal production planning. Applied Energy 174 (2016), S. 88-100.

SAUER ET AL. 2019

Sauer, A.; Abele, E.; Buhl, H.U. (Hrsg.): Energieflexibilität in der deutschen Industrie: Ergebnisse aus dem Kopernikus-Projekt - Synchronisierte und energieadaptive Produktionstechnik zur flexiblen Ausrichtung von Industrieprozessen auf eine fluktuierende

Energieversorgung (SynErgie). Stuttgart: Fraunhofer Verlag 2019. ISBN: 978-3-8396-1479-2.

SCHERWITZ ET AL. 2020

Scherwitz, P.; Bank, L.; Roth, S.; Theumer, P.; Mundt, C.; Winter, M.; Heuer, T.; Hübner, M.; Seitz, M.; Schmidhuber, M.; Maibaum, J.: Digitale Transformation in der Produktionsplanung und -steuerung – Ergebnisse einer gemeinsamen Studie der produktiv-technischen Institute Fraunhofer IGCV, IFA, IPMT und WZL. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 115 (2020) 4, S. 252-256.

SCHMITT & ZENTIS 2011

Schmitt, R.; Zentis, T.: New approach for risk analysis and management in medical engineering. Proceedings - Annual Reliability and Maintainability Symposium (2011), S. 1-6.

SCHNELL 2020

Schnell, J.: Strategic Technology Planning for the Production of All-Solid-State Batteries. (Dissertation) Technische Universität München. München (2020).

SCHNORRENBERG & GOEBELS 1997

Schnorrenberg, U.; Goebels, G.: Risikomanagement in Projekten. Methoden und ihre praktische Anwendung. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag 1997. ISBN: 978-3-322-83064-7. (Springer eBook Collection Computer Science and Engineering).

SCHÖNSLEBEN 2020

Schönsleben, P.: Integrales Logistikmanagement. Operations und Supply Chain Management innerhalb des Unternehmens und unternehmensübergreifend. 8. Auflage. Berlin: Springer Vieweg 2020. ISBN: 978-3-662-60672-8.

SCHOTT ET AL. 2019

Schott, P.; Sedlmeir, J.; Strobel, N.; Weber, T.; Fridgen, G.; Abele, E.: A Generic Data Model for Describing Flexibility in Power Markets. Energies 12 (2019) 10, S. 1893.

SCHUH & STICH 2012

Schuh, G.; Stich, V.: Produktionsplanung und -steuerung 1. Grundlagen der PPS. 4. Aufl. Berlin: Springer 2012. ISBN: 978-3-642-25422-2. (SpringerLink Bücher).

SCHULTZ 2018

Schultz, C.: System zur energieorientierten Produktionssteuerung in der auftragsbezogenen Fertigung. (Dissertation) Technische Universität München (2018).

SCHULZ ET AL. 2022

Schulz, J.; Paul, M.; Roth, S.; Scharmer, V.; Bank, L.; Zaeh, M. F.: Assessing energy flexibility in non-energy-intensive manufacturing companies. IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC) (2022), S. 1-5.

SCHUMACHER & WÜRFEL 2015

Schumacher, I.; Würfel, P.: Strategien zur Strombeschaffung in Unternehmen. Energieeinkauf optimieren, Kosten senken. Wiesbaden: Springer Fachmedien 2015.

SCHWARTZ 2004

Schwartz, F.: Störungsmanagement in Produktionssystemen. Aachen: Shaker 2004. ISBN: 3832230882. (Schriften zur quantitativen Betriebswirtschaftslehre und Wirtschaftsinformatik).

SEITI ET AL. 2019

Seiti, H.; Hafezalkotob, A.; Najafi, S. E.; Khalaj, M.: Developing a novel risk-based MCDM approach based on D numbers and fuzzy information axiom and its applications in preventive maintenance planning. *Applied Soft Computing* 82 (2019), S. 105559.

SETHI & SETHI 1990

Sethi, A. K.; Sethi, S. P.: Flexibility in manufacturing: A survey. *The International Journal of Flexible Manufacturing Systems* 2 (1990), S. 289-328.

SHAKYA & CHAUHAN 2019

Shakya, R.; Chauhan, P.: Modelling of Risk Analysis in Production System. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 691 (2019), S. 12087.

SHANNON 1972

Shannon, C. E.: *The mathematical theory of communication*. Urbana: University of Illinois Press 1972. ISBN: 0-252-72548-4.

SIMON ET AL. 2018

Simon, P.; Zeiträg, Y.; Glasschroeder, J.; Gutowski, T.; Reinhart, G.: Approach for a Risk Analysis of Energy Flexible Production Systems. *Procedia CIRP* 72 (2018), S. 677-682.

SIMON 2020

Simon, P.: *Methodik zur risikoorientierten Bewertung von Energieflexibilität in Produktionssystemen*. (Dissertation) Technische Universität München. München (2020).

SOUSA ET AL. 2015

Sousa, S.; Nunes, E.; Lopes, I.: Measuring and managing operational risk in industrial processes. *FME Transaction* 43 (2015) 4, S. 295-302.

STEINMETZ 2007

Steinmetz, M.: *Risikosituation und -handhabung in der Produktion*. (Dissertation) Technische Universität München (2007).

STERNER 2017

Sterner, M.: *Energiespeicher - Bedarf, Technologien, Integration*. Bedarf, Technologien, Integration: Springer Berlin, Heidelberg 2017. ISBN: 978-3-662-48892-8.

STROHMEIER 2007

Strohmeier, G.: *Ganzheitliches Risikomanagement in Industriebetrieben*. Grundlagen, Gestaltungsmodell und praktische Anwendung. Wiesbaden: DUV 2007. ISBN: 978-3-8350-0683-6. (Springer eBook Collection Business and Economics).

STUMPE 2019

Stumpe, L.: Optimierung der industriellen Nutzung von Energiespeichern unter Berücksichtigung der Produktionsplanung. (Masterarbeit)Universität Augsburg (2019).

TERBRACK ET AL. 2021

Terbrack, H.; Claus, T.; Herrmann, F.: Energy-Oriented Production Planning in Industry: A Systematic Literature Review and Classification Scheme. Sustainability 13 (2021) 23, S. 13317.

TOBA 2000

Toba, H.: Segment-based approach for real-time reactive rescheduling for automatic manufacturing control. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing 13 (2000) 3, S. 264-272.

ÜBERTRAGUNGSNETZBETREIBER 2023

Übertragungsnetzbetreiber: Netztransparenz.de: Informationsplattform der deutschen Übertragungsnetzbetreiber. <<https://www.netztransparenz.de/Daten-zur-Regelenergie/reBAP/reBAP>> - 28.02.2023.

ULRICH & HILL 1976a

Ulrich, P.; Hill, W.: Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre (Teil I). WiST Zeitschrift für Ausbildung und Hochschulkontakt (1976) 7, S. 304-309.

ULRICH & HILL 1976b

Ulrich, P.; Hill, W.: Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre (Teil II). WiST Zeitschrift für Ausbildung und Hochschulkontakt (1976) 8, 345–390.

UNITED NATIONS 2015

United Nations: Adoption of the Paris Agreement. 2015.

UNTERBERGER 2020

Unterberger, E.: Methodik zur Gestaltung energieflexibler Produktionssysteme. (Dissertation)Technische Universität München. München (2020).

VDI 4602-1

VDI 4602-1: Energiemanagement Grundlagen, Blatt 1. Berlin: Beuth Verlag.

VDI 4661 2014

VDI 4661: Energiekenngrößen. Definitionen – Begriffe – Methodik. Berlin: Beuth Verlag 2014.

VDI 5207-1 2020

VDI 5207-1: Energieflexible Fabrik, Blatt 1 Grundlagen. Berlin: Beuth Verlag 2020.

VDI 5207-2 2021

VDI 5207-2: Energieflexible Fabrik, Blatt 2 Identifikation und technische Bewertung. Berlin: Beuth Verlag 2021.

VDI ZRE 2018

VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (VDI ZRE): Ökologische und ökonomische

Bewertung des Ressourcenaufwands. Stationäre Energiespeichersysteme in der industriellen Produktion. 2018.

VERNIM 2020

Vernim, S.: Anforderungsermittlung für das Montagepersonal in der digitalen Transformation. (Dissertation) Technische Universität München. München (2020).

VERSTEEGEN 2003

Versteegen, G.: Risikomanagement in IT-Projekten. Gefahren Rechtzeitig Erkennen und Meistern. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin, Heidelberg 2003. ISBN: 978-3-642-55737-8. (Xpert. press Ser).

VIEIRA ET AL. 2003

Vieira, G. E.; Herrmann, J. W.; Lin, E.: Rescheduling Manufacturing Systems: A Framework of Strategies, Policies, and Methods. Journal of Scheduling 6 (2003) 1, S. 39-62.

VUJICIC ET AL. 2017

Vujicic, M.; Papic, M.; Blagojevic, M.: Comparative analysis of objective techniques for criteria weighing in two MCDM methods on example of an air conditioner selection. Tehnika 72 (2017) 3, S. 422-429.

WANG ET AL. 2010a

Wang, X.; Li, D.; O'brien, C.; Li, Y.: A production planning model to reduce risk and improve operations management. International Journal of Production Economics 124 (2010) 2, S. 463-474.

WANG ET AL. 2010b

Wang, M.; Lin, S.-J.; Lo, Y.-C.: The comparison between MAUT and PROMETHEE. IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (2010), S. 753-757.

WANG ET AL. 2019

Wang, J.; Zhang, Y.; Liu, Y.; Wu, N.: Multiagent and Bargaining-Game-Based Real-Time Scheduling for Internet of Things-Enabled Flexible Job Shop. IEEE Internet of Things Journal 6 (2019) 2, S. 2518-2531.

WEBER 2020

Weber, M.: Entwicklung einer Methode zur Klassifizierung, Bewertung und Kompensation von Produktionsrisiken im Rahmen der energieorientierten Produktionsplanung. (Masterarbeit) Hochschule Kempten. Kempten (2020).

WEIG 2008

Weig, S.: Konzept eines integrierten Risikomanagements für die Ablauf- und Strukturgestaltung in Fabrikplanungsprojekten. (Dissertation) Technische Universität München (2008).

WEMHÖNER 2005

Wemhöner, N.: Flexibilitätsoptimierung zur Auslastungssteigerung im Automobilbau. (Dissertation) RWTH Aachen (2005).

WIENDAHL ET AL. 2007

Wiendahl, H.-P.; ElMaraghy, H. A.; Nyhuis, P.; Zäh, M. F.; Wiendahl, H.-H.; Duffie, N.; Brieke, M.: Changeable Manufacturing - Classification, Design and Operation. CIRP Annals - Manufacturing Technology 56 (2007) 2, S. 783-809.

WIENDAHL 2010

Wiendahl, H.-P.: Betriebsorganisation für Ingenieure. 7., aktualisierte Aufl. München: Hanser 2010. ISBN: 978-3-446-41878-3.

WONSAK 2022

Wonsak, I.: Evaluation der Zukunftsrobustheit von Produktionssystemen durch Stress-tests. (Dissertation) Technische Universität München. München (2022).

WU ET AL. 2015

Wu, W.-S.; Yang, C.-F.; Chang, J.-C.; Château, P.-A.; Chang, Y.-C.: Risk assessment by integrating interpretive structural modeling and Bayesian network, case of offshore pipeline project. Reliability Engineering & System Safety 142 (2015), S. 515-524.

YILMAZ & HARMANCIOGLU 2010

Yilmaz, B.; Harmancioglu, N.: Multi-criteria decision making for water resource management: a case study of the Gediz River Basin, Turkey. Water SA 36 (2010) 5.

YOU ET AL. 2009

You, F.; Wassick, J. M.; Grossmann, I. E.: Risk management for a global supply chain planning under uncertainty: Models and algorithms. AIChE Journal 55 (2009) 4, S. 931-946.

ZADEH 2008

Zadeh, L. A.: Is there a need for fuzzy logic? Information Sciences 178 (2008) 13, S. 2751-2779.

ZANAKIS ET AL. 1998

Zanakis, S. H.; Solomon, A.; Wishart, N.; Dubliss, S.: Multi-attribute decision making: A simulation comparison of select methods. European Journal of Operational Research 107 (1998) 3, S. 507-529.

ZAVADSKAS ET AL. 2014

Zavadskas, E. K.; Turskis, Z.; Kildienė, S.: State of art surveys of overviews on MCDM/MADM methods. Technological and Economic Development of Economy 20 (2014) 1, S. 165-179.

Anhang

A.1 Betreute Studienarbeiten im Themengebiet

Im Rahmen dieser Dissertation entstanden am Fraunhofer-Institut für Gießerei-, Composite und Verarbeitungstechnik IGCV unter wesentlicher wissenschaftlicher, fachlicher und inhaltlicher Anleitung des Autors die im Folgenden umgekehrt chronologisch aufgeführten studentischen Arbeiten. Ergebnisse dieser Arbeiten sind in Teilen in Form von Publikationen in die vorliegende Dissertation eingegangen. Der Autor dankt allen Studentinnen und Studenten für ihr Engagement bei der Unterstützung dieser wissenschaftlichen Arbeit.

- *Huber, Mirjam.* Auswahl und Integration von präventiven und reaktiven Maßnahmen zur Risikobehandlung in der energieorientierten Produktionsplanung. Masterarbeit, Technische Universität München, abgegeben im April 2021 (eingegangen in Publikation P4)
- *Kalchschmid, Vincent.* Kostenbewertung von Produktionsrisiken und Kompensationsmaßnahmen in energieflexiblen Produktionssystemen. Masterarbeit, Hochschule Kempten, abgegeben im Oktober 2020 (eingegangen in Publikation P3)
- *Weber, Markus.* Entwicklung einer Methode zur Klassifizierung, Bewertung und Kompensation von Produktionsrisiken im Rahmen der energieorientierten Produktionsplanung. Masterarbeit, Hochschule Kempten, abgegeben im April 2020. (eingegangen in Publikation P1)
- *Stumpe, Lukas.* Optimierung der industriellen Nutzung von Energiespeichern unter Berücksichtigung der Produktionsplanung. Masterarbeit, Universität Augsburg, abgegeben im Mai 2019 (eingegangen in Publikation P2)

Im Rahmen der Tätigkeit am Fraunhofer-Institut für Gießerei-, Composite und Verarbeitungstechnik IGCV betreute der Autor weiterhin die folgenden umgekehrt chronologisch aufgeführten Studienarbeiten in angrenzenden Themenbereichen. Auch diesen Studentinnen und Studenten sei herzlich für ihr Engagement gedankt.

- *Erhart, Veronika.* Methode zur Entwicklung und Bewertung eines standortindividuellen Energieversorgungskonzepts mit Wasserstoff als Langfristspeicher. Masterarbeit, Hochschule Augsburg, abgegeben im März 2022
- *Ohmer, Juliane.* Ableitung und Auswahl von Maßnahmen zur Risikobehandlung in der energieorientierten Produktionsplanung und -steuerung. Masterarbeit, Universität Augsburg, abgegeben im August 2021
- *Klement, Timo.* Entwicklung einer Dekarbonisierungs-Roadmap: Identifikation, zeitliche Einordnung und Bewertung von Maßnahmen zur Reduktion von CO₂-Emissionen innerhalb eines Produktionssystems. Masterarbeit, Universität Augsburg, abgegeben im Juli 2021

- *Sultani, Darius*. Pfade zum klimaorientierten Produktionsbetrieb: Zielsysteme und Modelle der Produktionsplanung und -steuerung für die Dekarbonisierung von Produktionssystemen. Masterarbeit, Technische Universität München, abgegeben im Juni 2021
- *Artmann, Isabel*. Entwicklung und Analyse von Dekarbonisierungsszenarien für die industrielle Brennstoffversorgung am Beispiel eines Unternehmens auf dem Gebiet der Massivumformung. Masterarbeit, Hochschule Augsburg, abgegeben im März 2021
- *Pfeifer, Jonas*. Prognose von Störungs- und Kompensationsauswirkungen in einem energieflexiblen Produktionssystem, Bachelorarbeit, Hochschule Ravensburg-Weingarten, abgegeben im August 2020.
- *Kuhn, Eugen*. Methode zur Ableitung einer intelligenten Produktionssteuerung für die variantenreiche Serienfertigung aus der Analyse der Material- und Informationsflüsse am Beispiel eines mittelständischen Fahrzeugherstellers. Bachelorarbeit, Hochschule Augsburg, abgegeben im Mai 2020
- *Nikolla, Anton*. Entwicklung einer Digitalisierungs-Roadmap am Beispiel eines Handelsunternehmens der Verpackungsbranche. Bachelorarbeit, Technische Universität München, abgegeben im Februar 2020
- *Rauer, Raffael*. Risikomanagement in der energieorientierten Produktionsplanung und -steuerung, Bachelorarbeit, Hochschule Augsburg, abgegeben im November 2019
- *Spitzer, Sophia*. Modellierung und Simulation von Elektrofahrzeugen als Batterspeicher in einer energieflexiblen Fabrik (Vehicle-to-Factory). Semesterarbeit, Technische Universität München, abgegeben im November 2018
- *Fischer, Jasmin*. Simulationsbasierte Analyse energieflexibler Fabriken in einem regionalen Versorgungssystem. Masterarbeit, Hochschule Augsburg, abgegeben im Oktober 2018
- *Krischke, Fabian*. Erzeugerseitige Optimierung einer energieflexiblen Fabrikinfrastruktur mit thermischen Verbrauchern. Masterarbeit, Hochschule Augsburg, abgegeben im Oktober 2018
- *Klement, Timo*. Unterstützung des Energiemanagements produzierender Unternehmen durch bidirektionale Ladevorgänge – Eine Potenzialanalyse zur Nutzung der Speicher von Elektromobilen im industriellen Umfeld. Bachelorarbeit, Hochschule Augsburg, abgegeben im August 2018
- *Rappold, Jonas*. Entwicklung einer modularen Simulationsumgebung zur Visualisierung und Analyse der Potentiale einer energieflexiblen Produktion in Süddeutschland. Masterarbeit, Technische Universität München, abgegeben im April 2018

A.2 Veröffentlichungen des Autors

Im Folgenden sind die Veröffentlichungen des Autors kategorisiert und umgekehrt chronologisch aufgeführt.

Konferenzbeiträge

Schulz, J.; Paul, M.; Roth, S.; Scharmer, V.; Bank, L.; Zaeh, M. F.: Assessing energy flexibility in non-energy-intensive manufacturing companies. IEEE Sustainable Power and Energy Conference iSPEC (2022) S. 1-5.

Roth, S.; Weber, M.; Hohmann, A.; Reinhart, G.: Risk Assessment and Treatment Planning for Energy-flexible Production Systems Using an Additional Cost Model. 2020 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management IEEM (2020) S. 85-90, doi: 10.1109/IEEM45057.2020.9309944.

Abele, M.; Unterberger, E.; Friedl, T.; Carda, S.; Roth, S.; Hohmann, A.; Reinhart, G.: Simulation-based evaluation of an energy oriented production planning system. Procedia CIRP 88 (2020) S. 246-251, doi: 10.1016/j.procir.2020.05.044.

Roth, S.; Stumpe, L.; Schmiegel, B.; Braunreuther, S.; Schilp, J.: An optimization-based approach for the planning of energy flexible production processes with integrated energy storage scheduling. Procedia CIRP 88 (2020) S. 258-264, doi: 10.1016/j.procir.2020.05.111.

Bank, L.; Rösch, M.; Unterberger, E.; Roth, S.; Rohrer, A.; Köberlein, J.; Braunreuther, S.; Schilp, J.: Comparison of Simulation-based and Optimization-based Energy Flexible Production Planning. Procedia CIRP 81 (2019) S. 294-299, doi: 10.1016/j.procir.2019.03.051.

Roth, S.; Spitzer, S.; Braunreuther, S.; Reinhart, G.: Modeling and simulation of electric vehicles as battery storage in an energy flexible factory. 11. Internationale Energiewirtschaftstagung IEWT, Wien (2019).

Roth, S.; Krischke, F.; Carda, S.; Rieser, C.; Braunreuther, S.; Reinhart, G.: Methode zur erzeugungsseitigen Optimierung einer energieflexiblen Fabrikinfrastruktur mit thermischen Verbrauchern. 11. Internationale Energiewirtschaftstagung IEWT, Wien (2019).

Roth, S.; Thimmel, M.; Fischer, J.; Schöpf, M.; Unterberger, E.; Braunreuther, S.; Buhl, H.U.; Reinhart, G.: Simulation-based analysis of energy flexible factories in a regional energy supply system. Procedia Manufacturing 33 (2019) S. 75-82, doi: 10.1016/j.promfg.2019.04.011.

Egert, R.; Tundis, A.; Roth, S.; Mühlhäuser, M.: A Service Quality Indicator for Apriori Assessment and Comparison of Cellular Energy Grids. Proceedings of the 10th International Conference in Sustainability on Energy and Buildings (2018) S. 322-332, doi: 10.1007/978-3-030-04293-6_32.

Roth, S.; Rappold, J.; Braunreuther, S.; Reinhart, G.: Modulare Simulationsumgebung zur Visualisierung und Analyse der Potenziale von industriellen Energieflexibilitäten. 15. Symposium Energieinnovation, Neue Energie für unser bewegtes Europa, Graz (2018).

Roth, S.; Rink, S.; Oliveras, H.; Levacher, R.: Power-to-Heat-Anlagen in Nahwärmenetzen zur Unterstützung der Elektrizitätsnetze. 15. Symposium Energieinnovation, Neue Energie für unser bewegtes Europa, Graz (2018).

Artikel in Fachzeitschriften

Scharmer, V.; Bank, L.; Halbrügge, S.; Haupt, L.; Köberlein, J.; Roth, S.; Schulz, J.; Vernim, S.; Weibelzahl, M.; Buhl, H.; Schilp, J.; Zaeh, M.: Regional marketing mechanisms for industrial energy flexibility enabled by service-oriented IT platforms. *at - Automatisierungstechnik* 72 (2024) 11, S. 1092-1108, doi: 10.1515/auto-2023-0133.

Kalchschmid, V.; Erhart, V.; Angerer, K.; Roth, S.; Hohmann, A.: Decentral Production of Green Hydrogen for Energy Systems: An Economically and Environmentally Viable Solution for Surplus Self-Generated Energy in Manufacturing Companies? *Sustainability* 15 (2023) 4, S. 2994, doi: 10.3390/su15042994.

Roth, S.; Huber, M.; Schilp, J.; Reinhart, G.: Risk Treatment for Energy-Oriented Production Plans through the Selection, Classification, and Integration of Suitable Measures. *Applied Sciences* 12 (2022) 13, S. 6410, doi: 10.3390/app12136410.

Köberlein, J.; Bank, L.; Roth, S.; Köse, E.; Kuhlmann, T.; Prell, B.; Stange, M.; Münnich, M.; Flum, D.; Moog, D.; et al.: Simulation Modeling for Energy-Flexible Manufacturing: Pitfalls and How to Avoid Them. *Energies* 15 (2022) 10, S. 3593, doi: 10.3390/en15103593.

Philipp, M.; Collath, N.; Roth, S.; Theumer, P.; Will-Ehlers, G.; Kellermann, M.; Hesse, H.: Batteriespeicherlösungen zur energiewirtschaftlichen Optimierung von Industriebetrieben. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 117 (2022) 5, S. 305-311, doi: 10.1515/zwf-2022-1059.

Roth, S.; Sultani, D.; Artmann, I.; Klement, T.; Angerer, K.; Bank, L.: Dekarbonisierung der Produktion: Ansätze und Anwendungsfälle für die nachhaltige Produktionsplanung und Brennstoffversorgung. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 117 (2022) 3, S. 109-116, doi: 10.1515/zwf-2022-1030.

Kalchschmid, V.; Hartmann, C.; Angerer, K.; Roth, S.; Rösch, M.; Hohmann, A.; Günther, D.; Volk, W.: WindMelt: Ökonomische und ökologische Betrachtung der Direktnutzung von Windstrom zum Schmelzen von Aluminium. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 116 (2021) 12, S. 922-930, doi: 10.1515/zwf-2021-0131.

Roth, S.; Kalchschmid, V.; Reinhart, G.: Development and evaluation of risk treatment paths within energy-oriented production planning and control. *Prod. Eng. Res. Devel.*, 15 (2021) 3-4, S. 413-430, doi: 10.1007/s11740-021-01043-5.

Roth, S.; Nikolla, A.: Vorgehen zur Erstellung einer Digitalisierungsroadmap für das Supply-Chain-Management. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 115 (2020) 9, S. 634-640, doi: 10.3139/104.112402.

Scherwitz, P.; Bank, L.; Roth, S.; Theumer, P.; Mundt, C.; Winter, M.; Heuer, T.; Hübner, M.; Seitz, M.; Schmidhuber, M.; et al.: Digitale Transformation in der Produktionsplanung und -steuerung: Ergebnisse einer gemeinsamen Studie der produktionstechnischen Institute Fraunhofer IGCV, IFA, IPMT und WZL. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 115 (2020) 4, S. 252-256, doi: 10.3139/104.112271.

Roth, S.; Reinhart, G.: Risikomanagement in der energieorientierten Produktionsplanung und -steuerung. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 114 (2019) 12, S. 823-827, doi: 10.3139/104.112218.

Roth, S.; Schott, P.; Ebinger, K.; Halbrügge, S.; Kleinertz, B.; Köberlein, J.; Püschel, D.; Buhl, H.U.; Ober, S.; Reinhart, G.; et al.: The Challenges and Opportunities of Energy-Flexible Factories: A Holistic Case Study of the Model Region Augsburg in Germany. Sustainability, 12 (2020) 1, S. 360, doi: 10.3390/su12010360.

Roth, S.; Klement, T.; Braunreuther, S.; Reinhart, G.: Vehicle-to-Factory: Eine Potenzialanalyse zur Nutzung der Speicher von Elektromobilen im industriellen Umfeld. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 113 (2018) 9, S. 565-570, doi: 10.3139/104.111962.

Artikel in Magazinen

Kalchschmid, V.; Roth, S.: Defossilisierung der Hopfentrocknung – Transformationsprojekt Grüner Hopfen. ew – Magazin für die Energiewirtschaft, 123 (2024) 7-8, S. 28-35.

Roth, S.; Kalchschmid, V.; Wörle, M.: Digitales Energiemonitoring: Energiekosten und Treibhausgasemissionen in der Produktion senken. Mittelstand-Digital Magazin: Wissenschaft trifft Praxis, Ausgabe 21 – Klimaneutralität (2024) S. 48-55

Daub, R.; Härdtlein, C.; Roth, S.: Die Verwaltungsschale – Basis für nachhaltigen Ressourceneinsatz in der Produktion. ManagerWissen, Ad Special in der Gesamtausgabe des manager magazins (2023) 2.

Hartmann, C.; Gruber, M.; Günther, D.; Volk, W.; Kalchschmid, V.; Angerer, K.; Roth, S.; Rösch, M.; Hohmann, A.: Aluminium schmelzen mit Windstrom: Potenzialstudie WindMelt. Gießerei, 108 (2021) 10, S. 50-54.

Unterberger, E.; Roth, S.; Reinhart, G.: Wie industrielle Flexibilitäten das Energiesystem unterstützen können. ew – Magazin für die Energiewirtschaft, 117 (2018) Spezial I, S. 18-21.

Roth, S.; Oliveras, H.; Levacher, R.: In Saarlouis entsteht ein resilientes Polynetz. ew – Magazin für die Energiewirtschaft, 115 (2016) Spezial IV, S. 28-30.

Buchbeiträge

Bank, L.; Blöchl, B.; Buhl, H.U.; et al.: Energieflexible Modellregion Augsburg. In: Energieflexibilität in der deutschen Industrie, Band 2: Markt- und Stromsystem, Managementsysteme und Technologien energieflexibler Fabriken, Sauer, A.; Buhl, H.U.; Mitsos, A.; Weigold, M. (Hrsg.), Fraunhofer Verlag, Stuttgart (2022) S. 117-157, ISBN 978-3-8396-1778-6.

Lödding, H.(Hrsg.); Mundt, C.; Winter, M.; Heuer, T.; Hübner, M.; Seitz, M.; Schmidhuber, M.; Maibaum, J.; Bank, L.; Roth, S.; et al.: PPS-Report 2019 – Studienergebnisse; TEWISS Verlag, Garbsen (2019) ISBN 978-3-95900-402-2.

Reinhart, G.; Roth, S.; Unterberger, E.; Simon, P.; Ober, S.; Ebinger, K.; Püschel, D.; Seitz, M.; Pitschke, T.; et al.: Erfahrungsbericht aus einer Modellregion. In: Energieflexibilität in der deutschen Industrie: Ergebnisse aus dem Kopernikus-Projekt Synchronisierte und energieadaptive Produktionstechnik zur flexiblen Ausrichtung von Industrieprozessen auf eine fluktuierende Energieversorgung (SynErgie), Sauer, A.; Abele, E.; Buhl, H.U. (Hrsg.), Fraunhofer Verlag, Stuttgart (2019) S. 195-240, ISBN 978-3-8396-1479-2.

Putz, M.; Böhme, J.; Büttner, T.; Gentzen, J.; Päßler, T.; Prell, B.; Reinhardt, H.; Richter, M.; Strehle, H.-M.; Brecher, C.; et al.: Maschinen- und Anlagenbau. In: Energieflexibilität in der deutschen Industrie: Ergebnisse aus dem Kopernikus-Projekt Synchronisierte und energieadaptive Produktionstechnik zur flexiblen Ausrichtung von Industrieprozessen auf eine fluktuierende Energieversorgung (SynErgie), Sauer, A.; Abele, E.; Buhl, H.U. (Hrsg.), Fraunhofer Verlag, Stuttgart (2019) S. 645-676, ISBN 978-3-8396-1479-2.

Beiträge in Podcasts

Wesche, J. (Moderator); Fritz, M. (Moderator); Roth, S.; Hohmann, A.: Nachhaltige Energieversorgung in der Produktion. enPower Energiewende Podcast, <https://www.enpower-podcast.de/podcast/56>, veröffentlicht im Januar 2022

Pletz, A., (Moderatorin); Köberlein, J.; Roth, S.: SynErgie: Flexibler Stromverbrauch als smarte Lösung für energieintensive Fabriken. Fraunhofer-Podcast: Forschung erleben – Zukunft hören, <https://www.fraunhofer.de/de/mediathek/podcasts/podcasts-2021/podcast-synergie.html>, veröffentlicht im März 2021

Wittmann, G. (Moderator); Jäckle, C.; Roth, S.: Digitalisierung im Großhandel, handelkompetent – Mittelstand-Digital Zentrum Handel, <https://soundcloud.com/handelkompetent/handelkompetent-podcast-folge-12>, veröffentlicht im Mai 2020

A.3 Eingegangene Publikationen und Eigenanteile

- Publikation P1:** Roth, S.; Weber, M.; Hohmann, A.; Reinhart, G. Risk Assessment and Treatment Planning for Energy-flexible Production Systems Using an Additional Cost Model. 2020 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management IEEM (2020) S. 85-90, doi:10.1109/IEEM45057.2020.9309944.
- Publikation P2:** Roth, S.; Stumpe, L.; Schmiegel, B.; Braunreuther, S.; Schilp, J. An optimization-based approach for the planning of energy flexible production processes with integrated energy storage scheduling. Procedia CIRP 88 (2020) S. 258-264, doi:10.1016/j.procir.2020.05.111.
- Publikation P3:** Roth, S.; Kalchschmid, V.; Reinhart, G. Development and evaluation of risk treatment paths within energy-oriented production planning and control. Prod. Eng. Res. Devel., 15 (2021) 3-4, S. 413-430, doi:10.1007/s11740-021-01043-5.
- Publikation P4:** Roth, S.; Huber, M.; Schilp, J.; Reinhart, G. Risk Treatment for Energy-Oriented Production Plans through the Selection, Classification, and Integration of Suitable Measures. Applied Sciences 12 (2022) S. 6410, doi:10.3390/app12136410.

Die nachfolgende Tabelle führt die eingegangenen Publikationen mit den prozentualen Eigenanteilen des Autors dieser Dissertation auf. Alle Publikationen wurden in enger Zusammenarbeit mit den Co-Autorinnen und Co-Autoren entwickelt.

Aufgabe	P1	P2	P3	P4
Entwicklung und Konkretisierung der Forschungsfrage	70 %	70 %	70 %	75 %
Einordnung in den Stand der Technik	70 %	60 %	70 %	65 %
Entwicklung des methodischen Vorgehens	70 %	65 %	60 %	70 %
Aufbau des Simulationsmodells und Definition der Simulationsstudien	65 %	65 %	60 %	60 %
Datenakquise und Aufbereitung, Aufbau von Softwareschnittstellen sowie Durchführung der Simulationsstudien	70 %	65 %	60 %	60 %
Interpretation der Simulationsergebnisse	75 %	70 %	70 %	75 %
Einordnung in den Rahmen des Forschungsvorhabens und Diskussion der Ergebnisse	70 %	70 %	75 %	75 %
Ableitung von weiterem Forschungsbedarf für den Ausblick	70 %	70 %	70 %	70 %
Strukturierung des Manuskripts	70 %	70 %	70 %	80 %
Entwicklung von Abbildungen und Diagrammen	65 %	65 %	65 %	65 %
Verfassen des Manuskripts	70 %	70 %	65 %	70 %

Publikation P1 wird im Folgenden reproduziert mit freundlicher Genehmigung:

© 2020 IEEE Reprinted, with permission, from S. Roth; M. Weber; A. Hohmann; G. Reinhart, Risk Assessment and Treatment Planning for Energy-flexible Production Systems Using an Additional Cost Model, IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, December 2020

In reference to IEEE copyrighted material which is used with permission in this thesis, the IEEE does not endorse any of Technical University of Munich's products or services.

Publikation P2 wird reproduziert mit der freundlichen Genehmigung:

© 2020 Elsevier, This article was published in Procedia CIRP, Volume 88, S. Roth, L. Stumpe, B. Schmiegel, S. Braunreuther, J. Schilp, An optimization-based approach for the planning of energy flexible production processes with integrated energy storage scheduling, 258-264, Copyright Elsevier 2020

Die Publikationen P3 und P4

werden reproduziert unter den Bedingungen der Creative Commons Attribution 4.0 License (CC BY, <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), die die uneingeschränkte Weiterverwendung des Werks in jedem Medium erlaubt, sofern das Originalwerk korrekt zitiert wird.

Weiterhin wird aufgrund des Themenbezugs die Publikation

Roth & Reinhart, Risikomanagement in der energieorientierten Produktionsplanung und -steuerung, ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 114 (2019) 12, S. 823-827 mit freundlicher Genehmigung reproduziert. © 2019 Walter de Gruyter GmbH, Berlin/Boston

Risk Assessment and Treatment Planning for Energy-flexible Production Systems Using an Additional Cost Model

S. Roth¹, M. Weber¹, A. Hohmann¹, G. Reinhart¹

¹Fraunhofer Institute for Casting, Composite and Processing Technology IGCV, Augsburg, Germany
(stefan.roth@igcv.fraunhofer.de)

Abstract – As a result of the energy transition in Germany, companies can increasingly benefit from adjusting electricity consumption to fluctuating electricity prices. Through energy-oriented production planning, production processes are scheduled depending on price forecasts. The resulting electricity demand is procured with the obligation to consume the electricity within certain tolerances. The procurement entails risks, as faults or other unexpected events can lead to deviations in electricity consumption. These can be associated with high penalty costs, if contractual tolerances or the peak load are violated. To take a holistic view on the additional costs, the effects on production goals must also be considered. This paper shows the assessment of production risks and delivers an approach for suitable preventive or reactive measures by changing the production plan. The approach was applied on a use case of a foundry with exemplary risks, with the result of minimized fault-related additional costs through the selection of a cost-optimal measure.

Keywords – production planning and control, risk management, fault management, energy costs

I. INTRODUCTION

Since renewable power plants are often weather-dependent, there are strong fluctuations in the availability of electrical energy, which is also evident in the electricity markets. In 2019, the prices on the day-ahead market ranged between €121.46 per MWh and negative prices of up to €90.01 per MWh with an average of €37.64 per MWh in Germany [1]. These price fluctuations offer companies financial incentives by adapting their electricity requirements to the electricity markets. While small and medium-sized companies often buy electricity at a fixed price, a portfolio of different electricity products is available for larger and energy-intensive companies. Cost advantages can, for example, be achieved by putting together a cheap mix of traded products and adapting to the mentioned price spreads. [2]

However, this type of electricity procurement also involves risks, which have to be considered: the price risk due to deviations from the actual prices from the price forecast as well as the quantity risk, which arises from the obligation of the company to consume the purchased electricity in the corresponding situations [3]. If unexpected events, such as machine faults, mistakes of employees, or rush orders, result in an energy consumption below or above the procured range, the company can face high penalty costs. If the annual peak load is also exceeded in the event of a deviation, further high additional costs

arise since the peak load is included in the calculation of the grid charges for a billing period. [4].

Additionally, uncertainties must be taken into account through CO₂ certificates, because, since 2005, these must be kept in the correct quantity by energy-intensive companies such as iron metal or paper producers. In the event of insufficient CO₂ certificates, sanctions may arise [3]. To avoid this, possible unexpected events should be considered in the form of risks. The structure of energy-oriented production planning and control offers a suitable framework for risk assessment and treatment planning [5]. Currently, the energy-oriented production planning and control focuses particularly on making the energy requirements more flexible in terms of time to save energy costs. Several publications present methods for energy-oriented production planning, in the sense of adapting production systems to variable prices by flexibility measures [6–8]. As part of production control, further studies demonstrate the adaption during operation, as a short-term load management to avoid deviations from the planned load profile [9–11].

Based on these methods, this paper shows an approach for the assessment of unexpected events in the form of resulting risks and takes them into account in the production plan with suitable preventive or reactive measures for treatment. For this purpose, the state of the art is described in Chapter II. Chapter III introduces the approach, which is applied and discussed in Chapter IV. In Chapter V conclusions are presented as well as an outlook on future developments.

II. STATE OF THE ART

In the following, relevant contributions in the area of fault and risk management as well as cost models for monetary evaluation are introduced.

A. Fault Management in the Field of Production

A benchmark study by Brehm et al. [12] shows that the implementation of a fault management system can lead to a key competitive advantage in terms of the quality, cost and time targets. Possible faults include unexpected machine failures, spontaneous changes to customer wishes and inadequate care during work. Disorders should not be treated holistically, but should be prioritized according to severity. Schwartz [13] describes basic characteristics of fault management and has developed a simulation model for fault treatment based on this. The influence of the fault

compensation by means of selected strategies is taken into account. As a result of the simulation, the effects of the different strategies on relevant parameters is shown. Fischäder [14] developed a simulation model that enables a cost-effective implementation of a fault management into production. The model is equipped with measures to prevent interference or to react to an incident. An optimization approach with a genetic algorithm determines the cost-optimal measure. An approach to fault management in logistics networks, which can be transferred to production environment, is presented by Pulter et al. [15]. Prevention strategies in the form of reserves and time buffers are cost-effectively postponed in order to adhere to schedules even in the event of faults. Ostgathe et al. [16] present an approach to a knowledge-based fault management in quality assurance. The core component is the rule-based target-actual comparison of previously-defined product features. The comparison evaluates the quality of products and measures are then derived. The fault management is divided into fault monitoring, fault diagnosis, and fault rectification. Niehues [17] describes adaptive production control approaches for workshop production using automatic fault management, with the focus being on the classification of deriving measures.

B. Risk Management in the Field of Production

Risk management is characterized by the fact that, in addition to the extent of damage, faults are also assessed in advance with regard to the likelihood of occurrence, thus enabling preventive measures. Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) represents an established methodical procedure for analyzing a system with regard to errors, their causes and effects [18]. Greiner [19] describes the integration of risk management into process models. Process models can be used to identify relationships between the cause, event and impact of production risks. In addition, compensation measures and indicators for risk monitoring can be integrated into the process model. Simon et al. [20] use the deviating temporal properties to calculate the extent of damage to a production risk. A risk indicator is determined from the extent of damage and the probability of occurrence. The production risks are assessed on the basis of the extent of damage and the probability of occurrence by Klöber-Koch et al. [21]. Risk acceptance, risk reduction and risk avoidance are mentioned as general treatment methods. The production risks are monitored via deviations from target parameters. An approach to integrate stochastic events influencing the availability of energy flexibility potentials and profitability to an energy-oriented production planning system is presented in Abele et al. [22].

C. Cost Models in the Field of Production

Niehues [17] considers the additional costs that are caused by a fault supplementary to the normal process flow. The respective cost types are strongly company-

specific and sometimes assumed. Machine or personnel costs can be determined using company-specific hourly rates and the increased expenditure of time. The aim is to provide information about the respective additional costs due to various faults and how to remedy them in order to determine the most cost-effective compensation. The additional costs include, according to Pielmeier [23], the sum of all event costs and all measure costs within a certain period of time that are necessary to compensate faults. The event costs consist of production costs, logistics costs, delay costs and opportunity costs. The measure costs, which include all costs which arise by the initiation of a measure, are considered separately, and have a fixed and a variable share of costs.

Possible costs in the energy-oriented production planning and control are considered by Roesch et al. [24]. These are formed from the sum of delivery costs and production costs. The delivery costs are specified as early and late costs as well as the actual delivery costs. In addition, energy costs through variable electricity prices are included in the production costs. Fluctuations in electricity prices on the electricity exchange market can thus be used to identify the most cost-effective process flow. The cost model according to Schultz [9] focuses on energy costs. In addition to the costs of variable electricity prices, possible penalty costs towards power supply companies are also taken into account if the contract tolerances are exceeded. Furthermore, various electricity procurement options, such as balancing energy and self-generation, and their opportunity costs are included in the cost model in order to determine the cost-optimal shift of the load profile.

D. Need for Research

The mentioned contributions show possibilities for dealing with disorders in a situational manner or for considering events in the form of risks. Most of the work focuses on the logistical goals of production or solely on the consideration of energy costs. This paper therefore presents an approach that brings together the elements of fault and risk management. Furthermore, the approach is suitable for considering the effects on production goals and energy costs, and is therefore suitable for a total cost consideration.

III. APPROACH FOR RISK ASSESSMENT AND TREATMENT

A. Overview of the Approach

The overview of the approach is given in Fig. 1 in the form of a flow chart according to [25]. Production plans and operation plans for self-generation and energy storages act as input variables for the approach. After the risk assessment, which contains identification, classification and evaluation, relevant risks which need to be considered are filtered. Suitable preventive or reactive measures are then identified for these risks. The derivation of preventive

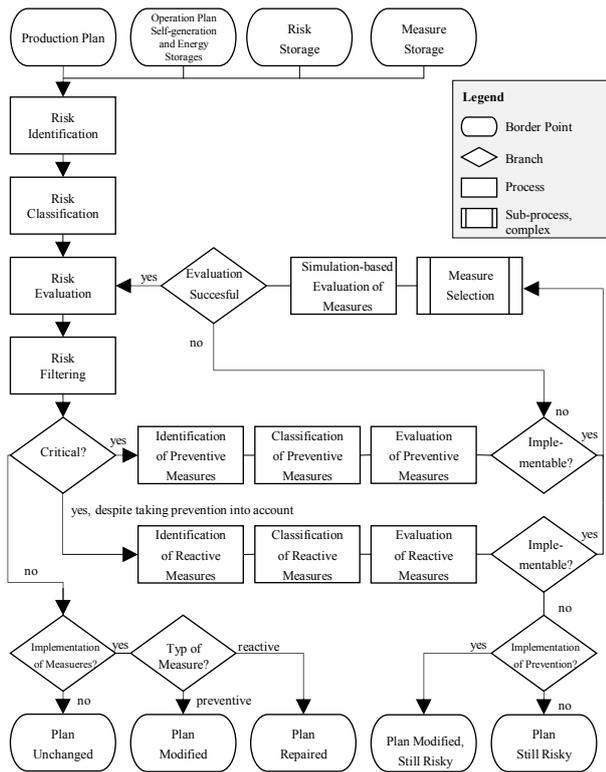


Fig. 1: Overview of the approach

and reactive measures offers the advantage of improving the probability of occurrence as well as applying corrections in the event of a fault. The measures are checked for their feasibility, and subsequently evaluated for their effectiveness using simulations. Depending on the application of the measures, a modified, repaired, or unchanged production plan is created.

B. Identification, Classification and Evaluation of Production Risks

The production risks are identified using creative and search methods based on [18, 26] and are collected in a risk storage. A classification of the production risks according to cause and effect supports the identification of possible compensation measures. The production risks are assessed according to the probability of occurrence P and the extent of damage E . To determine the probability of occurrence P , either historical disturbance profiles can be analyzed, or expert assessments of future processes can be consulted. The extent of damage E is determined using the percentage deviation of a key figure prioritized for the company, such as delivery reliability or difference between purchased and used electricity. Furthermore, a so-called critical filter factor C is introduced as part of the approach in order to assess the severity of the impact on costs in advance, and thus exclude minor risks from consideration before the actual cost analysis. The critical filter factor considers possible exceedances of the maximum annual electrical load, the contract tolerances with electricity suppliers and

the deviating CO₂ emissions. The risk assessment number (RAN) is calculated by the above-mentioned factors,

$$RAN = P * E * C. \tag{1}$$

The probability of occurrence and the extent of damage can assume numerical values between 1 and 10, the critical filter factor between 1 and 5. The factor should be chosen so that the numerical value 1 has a small negative impact on costs, such as certificate costs for emissions. The value 5 therefore corresponds to high effects, such as exceeding the annual peak load or delay of a delivery date. Thus, RAN ranges from 1 to 500. If the RAN is compared with a company-specific critical RAN, critical production risks can be filtered out. For the critical RAN, a numerical value must be defined, depending on the company’s risk preference and preferred robustness of the production plan. If critical production risks have been determined, specific statements can be made about potential additional costs. The procedure for determining critical production risks is illustrated in Fig. 2.

C. Treatment of Production Risks

Suitable measures are analyzed in the same way as the production risks. Energy-flexibility measures according to [27] are used as a starting point for the identification of compensation measures. A distinction is made between preventive and reactive measures within the classification of compensation measures. Preventive measures are used before the actual risk occurs in order to ward off the production risk, to significantly mitigate the effects or to reduce the probability of occurrence. Reactive measures can only be used to limit damage after the risk has occurred. The measures are assessed based on implementation costs, and the impact on the RAN as well as possible dependencies. The assessment factors are used to preselect feasible measures. A catalog of possible compensation measures for a critical production risk can thus be compiled and kept in a measure storage. The

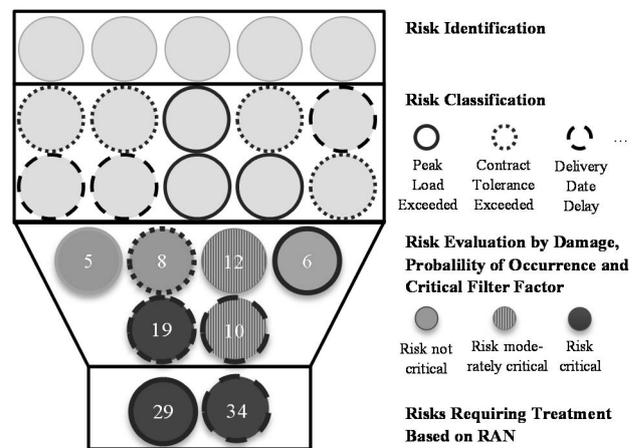


Fig. 2: Identification, classification, evaluation, and filtering of risks

selection of the most suitable measure requires a suitable solution method, e.g., analytical procedures or heuristics, according to specific requirements and restrictions [28].

D. Modeling of Production Risks and Treatment Effects

Production plans, production risks and possible compensation measures are modeled in the form of an electrical load profile. In this way, the deviations from the actual load prognosis can be determined. The exemplary modeling process can be seen in Fig. 3, whereby it shows the effects of a fault to the load profile. The load forecast results if the production plan is implemented as planned. Thus, it represents the purchased electrical energy that needs to be consumed. An error during the operation of a process step affects the load profile (Process with fault), which also affects the factory load profile (Load with fault). Deviations from the forecast can lead to high penalty costs. Fig. 4 shows how the effects of a production risk can be reduced in a target-oriented manner by using a suitable compensation option. Based on [27], the process steps B and C are swapped so that the companies load profile approaches the load forecast despite the fault, and penalty costs are thus avoided or reduced.

Furthermore, a cost model is designed that considers the relevant cost factors of energy-oriented production planning and control. The cost model considers the potential risk-related additional costs C_{Add} . The additional costs are calculated per time step T , and consist of the event costs C_{Event} and the costs for compensation measures $C_{Measure}$.

$$C_{Add} = \sum_{j \in T} C_{Event} + \sum_{j \in T} C_{Measure} \quad (2)$$

The measure costs represent any effort to implement a compensation measure. This must be calculated specifically for the respective application. For example, the costs for additional material, additional salaries or storage costs must be taken into account. The event costs are the costs that would arise due to the occurrence of a production risk in the form of an event compared to the normal operation of the process. Based on [23] and [24], the logistics costs $C_{Logistics}$, the production costs $C_{Production}$, the opportunity costs $C_{Opportunity}$ and the energy costs C_{Energy} are considered as parts of the event costs.

$$C_{Event} = C_{Logistics} + C_{Production} + C_{Opportunity} + C_{Energy} \quad (3)$$

This paper focuses on the representation of the energy-related additional costs due to production risks. Therefore, the exact composition of the energy costs is illustrated in the sections below. Energy costs include power costs C_{Power} , work costs C_{Work} and emissions costs $C_{Emissions}$.

$$C_{Energy} = C_{Power} + C_{Work} + C_{Emissions} \quad (4)$$

The power costs are determined using the typical power price c_{Power} and the risk-related deviation of the total power ΔP_{Total} . The binary decision variable x induces whether the company-specific maximum annual load is exceeded or not.

$$C_{Power} = x * \Delta P_{Total} * c_{Power} ; x \in [0; 1]. \quad (5)$$

The risk-related deviation of the load profile causes costs regarding the contractual partners with the electricity supplier C_{Pen} . In addition, costs arise from the balancing of the energy by the electricity supplier, which is composed of the required balancing energy consumption $\Delta W_{Balance}$ and a forecast balancing energy price for the effected period $c_{Balance}$. Furthermore, a possible additional consumption of energy $\Delta W_{Process}$ causes costs due to the typical electricity price c_{Work} . The binary decision variable y induces a possible violation of contract tolerances.

$$C_{Work} = y * C_{Pen} + y * \Delta W_{Balance} * c_{Balance} + \Delta W_{Process} * c_{Work} ; y \in [0; 1]. \quad (6)$$

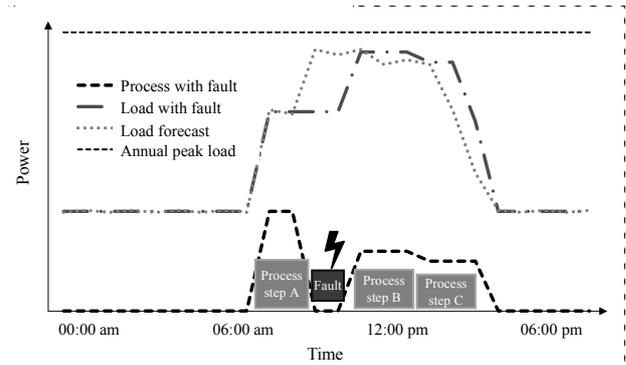


Fig. 3: Effects of a production risk on the load profile of a process

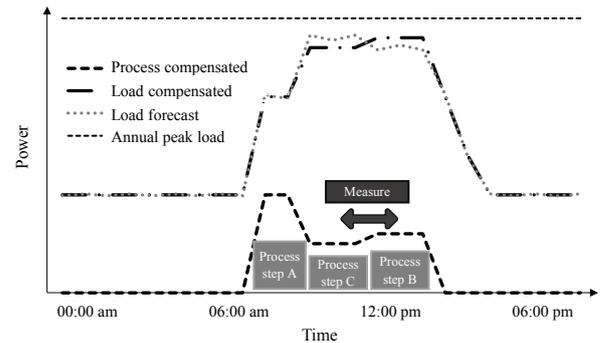


Fig. 4: Compensation option to reduce effects of a production risk

Besides the electricity costs, additional costs may arise due to increased risk-related CO₂ emissions. These are composed of the additional greenhouse gas emissions compared to the original planning Δm_{CO_2} , and the possible certificate costs c_{CO_2} in the case that the power consumption is higher than planned.

$$C_{Emissions} = \Delta m_{CO_2} * c_{CO_2} \quad (7)$$

IV. APPLICATION AND DISCUSSION

In order to demonstrate the applicability and to show potential further development opportunities, the approach is applied in the following on the basis of a real industrial use case. The results are then critically discussed.

A. Application of the Approach

The use case is a production process of a foundry with upstream and downstream processes. This consists of a total of five process steps, including preparatory works, mold manufacturing, melting, casting and post-processing. For the application of the approach, historical production plans and load profiles of the affected processes were used.

Interviews with process experts yielded five production risks. One of them was classified as critical, based on the dynamic assessment of the probability of occurrence, the extent of damage and the critical filter factor. The identified production risks, including RAN and potential event costs, are summarized in Table 1. The cost model was adapted to the specific application, whereby only logistic costs and work-related energy costs were significant.

The analysis of compensation measures was launched for the critical production risk "mold flawed." A measure analysis of this risk is therefore initiated. Two preventive measures (availability of replacement mold, more detailed quality inspections) and two reactive measures (postponement of process start, increase of capacity) were identified and evaluated. In the present application, the determination of the cost-optimal measure is solved analytically. The required target function can be derived using the introduced cost model. This includes minimizing the potential risk-related additional costs while at the same time observing the restrictions z . The restrictions include that the compensation measure must be available at the actual time of deployment. The target function is carried out for the number of all measures n .

$$\text{Min } C_{Add} = \sum_{i=1}^n \left[\left(\sum_{j \in T} C_{Logistics,i} + \sum_{j \in T} C_{Work,i} + \sum_{j \in T} C_{Measure,i} \right) * z_i \right]$$

Table 1: Identified risks including RAN and potential event costs

Identified Risk	RAN	Potential Event Costs	Measure Analysis
Oven failure	12	€1,808	no
Mold flawed	90	€4,294	yes
Casting polluted	6	€999	no
Casting cracked	9	€3,491	no
Melting plan flawed	12	€1,343	no

B. Results and Discussion

By the use of the cost model and the identified compensation measures, the target function could be solved. The preventive compensation measure "creation of replacement mold" was determined because it complied with the companies' restrictions and could achieve cost advantages of approximately €3,300 compared to the risk case. These cost advantages were achieved by adhering to the contract tolerances and the normal throughput time of the process, which were both exceeded in the case of the production risk "mold flawed." However, it must be considered that the production risks are subject to a probability of occurrence, which means that the occurrence is never certain. If the considered production risk "mold flawed" does not occur, and the assessment consequently resulted in a false positive, unnecessary additional costs of approximately €1,000 would result from the implementation of the preventive measure caused by additional wages and material costs. It is therefore a crucial element of the approach to determine a risk preference by the definition of the critical RAN, which is not balanced between measure costs. Rather, it is balanced between a high level of production risks and high costs for measures due to an undue need for certainty.

V. CONCLUSION AND OUTLOOK

Companies that adapt their electricity consumption to variable prices and thus react indirectly to the availability of renewable energy can make a contribution to the implementation of the energy transition, as the balance between power generation and consumption is supported [29]. In order to be able to implement the energy flexibility required for this, industry needs planning and control methods as well as reliable approaches for dealing with risks and faults. This study presents an approach wherein production risks are assessed in a production plan and then supplemented with suitable predictive or reactive measures. The validation based on industry data from a foundry has shown that the approach is suitable for determining energy-related additional costs in the event of faults and for determining suitable cost-effective countermeasures by means of mathematical optimization. (8) The application also shows a need for further development, in particular to simplify the feasibility in order to increase the portability and expand the range of functions. For example, the assessment of the extent of the damage E can be improved by quantifying several key figures or the potential additional costs instead of the previous evaluation of a single key figure. If necessary, the procedure for calculating the RAN can be expanded by a factor for the number of processes involved in order to prioritize production risks, which consequently spans over several processes. In addition, companies can be supported in setting the critical RAN and in determining the risk preference through a structured procedure.

Formal profiles to record production risks and compensation measures will increase the transferability,

but also enable further automation of the approach. Interactions can thus be modeled to represent a chain of several compensation measures. Additionally, the mathematical formulation of complex constraints that reflect the company and process-specific restrictions can then be considered.

In prospective studies, risk treatment can be further developed through preventive measures by enhancing the process to reduce the probability of occurrence. The further development of reactive measures requires a data model that is suitable for comparing current production values with limit values in order to enable early warnings.

In addition to production risks, the approach can also be used to map market risks if deviations from price forecasts are modeled as a further possible event with a dimension and probability of occurrence.

ACKNOWLEDGMENT

The authors gratefully acknowledge the financial support of the Kopernikus-Project “SynErgie” by the Federal Ministry of Education and Research (BMBF), and the project supervision by the project management organization Projektträger Jülich.

REFERENCES

- [1] Bundesnetzagentur, *SMARD Strommarktdaten*. [Online]. Available: <https://www.smard.de/home> (accessed: Mar. 23 2020).
- [2] I. Schumacher and P. Würfel, *Strategien zur Strombeschaffung in Unternehmen: Energieeinkauf optimieren, Kosten senken*. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2015.
- [3] P. Konstantin, *Praxisbuch Energiewirtschaft: Energieumwandlung, -transport und -beschaffung im liberalisierten Markt*. Springer Vieweg, 2013. Accessed: Aug. 17 2018.
- [4] F. Matzen and R. Tesch, *Industrielle Energiestrategie: Praxishandbuch für Entscheider des produzierenden Gewerbes*, 2017.
- [5] S. Roth and G. Reinhart, “Risikomanagement in der energieorientierten Produktionsplanung und -steuerung,” *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, vol. 114, no. 12, pp. 823–827, 2019, doi: 10.3139/104.112218.
- [6] L. Bank *et al.*, “Comparison of Simulation-based and Optimization-based Energy Flexible Production Planning,” in *Procedia CIRP* 81, 2019, pp. 294–299.
- [7] F. Keller, C. Schönborn, and G. Reinhart, “Energy-orientated Machine Scheduling for Hybrid Flow Shops,” *Procedia CIRP* 29 (2015), pp. 156–161.
- [8] J.-Y. Moon and J. Park, “Smart production scheduling with time-dependent and machine-dependent electricity cost by considering distributed energy resources and energy storage,” *International Journal of Production Research*, vol. 52, no. 13, pp. 3922–3939, 2014, doi: 10.1080/00207543.2013.860251.
- [9] C. M. Schultz, “System zur energieorientierten Produktionssteuerung in der auftragsbezogenen Fertigung,” Dissertation, Technical University of Munich, 2018.
- [10] M. Rösch, M. Lukas, C. Schultz, S. Braunreuther, and G. Reinhart, “An approach towards a cost-based production control for energy flexibility,” in *Procedia CIRP* 79 (2019), 2019, pp. 227–232.
- [11] J. Beier, *Simulation Approach Towards Energy Flexible Manufacturing Systems*, 2017.
- [12] N. Brehm, O. Aksoy, and W. Wellbrock, “Erfolgsfaktor Störungsmanagement,” *ZWF*, vol. 112, no. 12, pp. 843–847, 2017, doi: 10.3139/104.111840.
- [13] F. Schwartz, *Störungsmanagement in Produktionssystemen*. Aachen: Shaker, 2004.
- [14] H. Fischäder, *Störungsmanagement in netzwerkförmigen Produktionssystemen*, 1st ed. Wiesbaden: Dt. Univ.-Verl., 2007.
- [15] N. Pulter, J. Nimis, and P. C. Lockemann, “Störungsmanagement in offenen, getakteten Logistiknetzen,” *KI - Künstliche Intelligenz*, no. 24, pp. 131–136, 2010.
- [16] M. Ostgathe, M. F. Zäh, P. Grimmert, and T. Schüler, “Knowledge-based failure management in production processes,” *ZWF*, vol. 106, no. 11, pp. 838–843, 2011.
- [17] M. R. Niehues, “Adaptive Produktionssteuerung für Werkstattfertigungssysteme durch fertigungsbegleitende Reihenfolgebildung,” Dissertation, Technical University of Munich, 2016.
- [18] DIN EN 60812:2006 *Analysetechniken für die Funktionsfähigkeit von Systemen – Verfahren für die Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse (FMEA)*.
- [19] S. Greiner, *Risikoorientierte Prozessmodelle in BPMN – Stand des Wissens und Potenziale*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2013.
- [20] P. Simon, F. Roltsch, J. Glasschröder, and G. Reinhart, “Approach for a Potential Analysis of Energy Flexible Production Systems,” in *The 50th CIRP Conference on Manufacturing Systems*, 2017, pp. 580–585.
- [21] J. Klöber-Koch, S. Braunreuther, and G. Reinhart, “Predictive production planning considering the operative risk in a manufacturing system,” in *Procedia CIRP* 63 (2017), 2017, pp. 360–365.
- [22] M. Abele *et al.*, “Simulation-based evaluation of an energy oriented production planning system,” in *Procedia CIRP* 88 (2020), 2020 pp. 246–251.
- [23] J. Pielmeier, “System zur ereignisorientierten Produktionssteuerung,” Dissertation, Technical University of Munich, 2019.
- [24] M. Roesch, C. Berger, S. Braunreuther, and G. Reinhart, “Cost-model for Energy-oriented Production Control,” *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, pp. 158–162, 2018, doi: 10.1109/IEEM.2018.8607305.
- [25] *Informationsverarbeitung: Sinnbilder und ihre Anwendung.*, 66001, 1983.
- [26] F. Romeike, *Risikomanagement*. Springer Gabler, 2018.
- [27] VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V., *VDI 5207 Energieflexible Fabrik, Blatt 1 Grundlagen*, 2020.
- [28] L. März, W. Krug, O. Rose, and G. Weigert, *Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik: Praxisorientierter Leitfaden mit Fallbeispielen*, 2011.
- [29] S. Roth *et al.*, “The Challenges and Opportunities of Energy-Flexible Factories: A Holistic Case Study of the Model Region Augsburg in Germany,” *Sustainability*, vol. 12, no. 1, p. 360, 2020, doi: 10.3390/su12010360.

13th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering, CIRP ICME '19

An optimization-based approach for the planning of energy flexible production processes with integrated energy storage scheduling

Stefan Roth^{a,*}, Lukas Stumpe^{a,c}, Benedikt Schmiegel^c, Stefan Braunreuther^{a,b}, Johannes Schilp^{a,c}

^aFraunhofer Research Institute for Casting, Composite and Processing Technology IGCV, Am Technologiezentrum 10, 86159 Augsburg, Germany

^bFachhochschule Augsburg, University of Applied Science, An der Hochschule 1, 86161 Augsburg, Germany

^cUniversity of Augsburg, Chair of Digital Manufacturing, Department of Applied Computer Science, Universitätsstraße 2, 86159 Augsburg, Germany

* Corresponding author. Tel.: +49-821-90678-168 ; fax: +49-821-90678-199. E-mail address: stefan.roth@igcv.fraunhofer.de

Abstract

Due to the fluctuating energy supply of renewable energy systems, electricity prices on the markets are becoming increasingly volatile. This offers manufacturers opportunities to reduce costs by adapting production processes to the energy supply. So-called energy flexible factories are thus a decisive competitive factor and at the same time a solution component for a successful energy turnaround. The implementation of energy flexible factories requires energy-oriented production planning that makes appropriate use of flexibility measures. Energy storage systems supplement companies' flexibility options. In order to be able to use them cost-optimally, interactions with flexible production processes must be taken into account and planned. This paper introduces an optimization-based approach for the integrated planning of flexible production processes and battery storage scheduling.

© 2020 The Authors. Published by Elsevier B.V.

This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

Peer review under the responsibility of the scientific committee of the 13th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering, 17-19 July 2019, Gulf of Naples, Italy.

Keywords: energy flexibility; production planning; cost-efficient scheduling; battery storage; sustainable manufacturing

1. Motivation

In order to achieve the climate goals of the Paris Agreement from 2015 [1], the Federal Government of Germany submitted a climate protection plan in 2016. It describes targets for various sectors in order to be largely greenhouse gas-neutral in Germany by the year 2050. Of central importance is the energy sector, with a planned reduction of 358 tons of CO₂ equivalents in 2014 to a maximum of 183 tons of CO₂ equivalents by 2030. [2]. To achieve that, the so-called brown coal commission has recently issued a recommendation for phasing out lignite-fired power generation by 2038 [3]. These power plants are mainly replaced by wind turbines and photovoltaic systems, which use sustainable primary energy, but lead to weather-dependent feed-in fluctuations [4]. Demand side management (DSM) offers a high potential for balancing the electricity consumption with the volatile electricity generation by renewable energy sources. DSM originally consists of several activities to

influence customers' use of electricity [5]. With 47 percent of Germany's annual energy demand, industry presents a relevant element to equalize energy production and energy consumption [6]. Various current studies investigate how the energy consumption of production processes and production infrastructure can be adapted to a fluctuating energy supply [7–10]. Essential measures can be subdivided into categories, such as the shift of process starts, changes in machine occupancy and the use of battery storage [11]. Energy-oriented production planning is necessary to implement these measures. Here it is important to consider relocatable orders and the use of available storage capacity in order to achieve the cost-optimal plan. This contribution presents an approach to schedule both flexible loads and energy storage. Section 2 will introduce energy-oriented production planning and applicable battery storage systems. Section 3 presents the state of research. The approach is introduced and applied in section 4, followed by a summary and an outlook in Section 5.

2. Energy storages in energy-oriented production planning

2.1. Energy-oriented production planning

Production planning can be described as the coordination of production orders within certain planning horizons. It performs lot size planning, capacity planning and scheduling tasks. The result is released to the production control, which executes the production processes according to the plan [12].

On the one hand, the target parameters of production planning include high delivery reliability and short delivery time. On the other hand, there is the financial aim to lower production costs and capital commitment costs [13]. According to costs, energy efficiency has been the subject of production research for several years [14]. Energy flexibility is gaining in importance as part of the energy transition and as a possibility for energy cost reduction for companies by taking advantage of fluctuating electricity prices [15].

Due to the high complexity of planning problems and the new cost aspects caused by the importance of the resource energy, simulations or mathematical optimizations should be used to support the production planning tasks [16]. Optimizations based on the classic cost, time and quality objective of production are common. Short, medium and long-term planning can be distinguished [17]. The adjustment of consumption to price signals of the day-ahead market requires planning within the day before, as the electricity products are traded one day before delivery [18]. With this timeframe, the planning tasks with day-ahead market prices as the input size belong to operational production planning [17, 19].

2.2. Energy storage use in manufacturing companies

Energy storage technologies can be classified by the physical form of stored energy. Electrical storages are suitable for storing energy on short notice by means of coils or capacitors. Mechanical systems store energy in the form of potential or kinetic energy. Electrochemical storage, as a subgroup of chemical storage, holds the energy in the form of chemical compounds. This includes the widely used lithium-ion batteries [20]. Energy storage systems offer solutions to the problem of the integration of fluctuating energy sources. For example, they can be used to stabilize energy grids in peak hours or to store the surplus production of photovoltaic systems in households [21].

Energy storages are also applied in the industrial sector. A study by the German Chamber of Commerce and Industry [22] determined that in 2018 nearly 20 percent of German industrial companies used energy storage or planned to purchase it. The study also notes that 43 percent of companies have planned or already implemented measures in the field of electromobility. The use of electric vehicle storage within a company's charging infrastructure has been tested in several case studies as an alternative or supplement to stationary battery storage [23, 24]. According to simulation-based studies, this so-called vehicle-to-factory approach has the potential to support the energy procurement of manufacturing companies [25, 26].

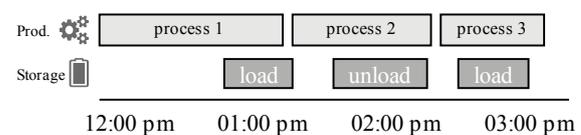
Different fields of storage application exist in the industry. In addition to the technical applications like emergency power supply and uninterruptible power supply, batteries are applied in the field of energy procurement [27]. Industrial companies are able to lower production costs through a reaction to the price signals of the European energy exchanges and the integration of companies' own generation facilities, such as photovoltaic and combined heat and power plants [28]. In addition, the use of electrical energy must consider contractual conditions in order to reduce energy costs. Examples are the reduction in absolute power consumption, the shift of electricity demand from high-tariff to low-tariff periods as well as the increase in the reliability of the electrical load profile to avoid penalties. In addition, revenues can be generated if switchable services are agreed on with suitable contractual partners. On the reserve power markets, targeted load adjustments or even the provision of this potential change in performance can be placed as a product [15].

Due to the required storage time of a few hours, lithium-ion batteries are currently being used in particular. Especially if multiple benefits can be realized, the operation of the storage systems is economical. A typical use case is minimizing peak loads combined with optimizing self-consumption [27].

2.3. Interactions of flexible loads and battery scheduling

The use of energy storage makes it possible to adjust the load profile of a company, without directly affecting production processes. Since certain processes can be influenced with regard to consumption, the planning of these processes should be carried out together with the scheduling of the energy storage in order to achieve a cost-optimal overall. Figure 1 shows an exemplary production plan and battery scheduling. While production processes must include not only energy prices but also logistical target figures, the loading and unloading processes can be used to tailor the total load to specific volatile prices.

Production plan and energy storage scheduling



Day-ahead prices and load profiles

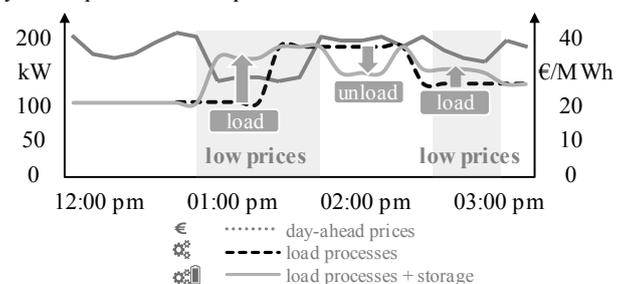


Figure 1: Scheduling of production processes and energy storage according to the day-ahead prices

Hereinafter, relocatable processes refer to energy-flexibility measures. [11] distinguishes energy flexibility measures in the industrial sector in line with the classic flexibility of production according to [29]. In the present approach, the measures "adjustment of process starts" and "interruption of processes" are taken into account. These take place in the context of the scheduling prior to the release to the production control and thus form classic measures of operational production planning.

3. State of research

In the following, the state of research with a focus on the industrial environment will be explained. As flexible loads and energy storage systems are established in grids and households, relevant approaches in these areas are also presented.

3.1. Load shifting and battery scheduling in grids

With the target of minimizing energy costs in micro grids [30, 31] apply mixed-integer linear optimization (MILP) based on predicted loads and decentralized generation. Balancing energy demand and the generation of renewable energy in the local distribution network can reduce the need for grid expansion. For that, energy flexibility options play a decisive role; using DSM especially provides significant cost saving potential.

[32] consider a collective of consumers with a shared renewable energy generation system and an energy storage system. By alternately solving two sub-problems, both the total cost and peak load minimization as well as the consumer decisions of the individuals are met.

A game theory approach is applied by [33], regarding an energy supplier and several households, each with its own photovoltaic (PV) system in combination with battery storage. A Nash Equilibrium provides the optimal energy consumption and storage capacity for every consumer.

[34] describe a quadratic optimization to minimize the energy costs of all participants of a smart grid while avoiding rebound peaks: the emergence of new peaks caused by multiple consumers responding to price signals and thus shifting their schedulable devices to low price periods.

Implementing two metaheuristics within a comparable problem, [35] achieve a reduced peak average ratio (PAR): peak load divided by mean load. Electric appliances are categorized according to their flexibility in use: power-shiftable, time-shiftable or non-shiftable.

3.2. Load shifting and battery scheduling in households

In the field of households, the combination of a photovoltaic system with battery storage to increase self-consumption is often investigated. [36] test mathematically optimized controllers compared to standard controllers. [37] optimize battery control by applying a genetic algorithm. The exemplary simulation of the months January, April, July and October shows savings potential in April and July.

This topic is also discussed by [38], who additionally integrate an electric vehicle into consideration. According to simulation results, a significantly higher energy demand can be covered by the PV system with storage compared to without.

A detailed use analysis of energy storage in households is designed by [39]. Interactions of PV self-generation with stationary and vehicle battery storage are shown, whereas shifting flexible loads is not. The capital value method implemented in MILP allows for implicit battery sizing.

Minimizing electricity procurement costs in residential buildings is also performed by [40]. Flexibilities through energy storage as well as flexible loads are used to avoid buying electricity in periods of high electricity prices.

Volatile self-generation in building energy management is also considered by [41]. A two-stage optimization (medium and short term) is applied. The simulation results for use in a hotel with a PV system and battery storage show cost savings.

[42] present a method for predicting the energy demand for a building planned for construction. Based on this, energy management with battery storage usage and variable electricity prices is simulated. By evaluating the respective profitability, the generated buffer for emergency power supply and space limitations, a suitable storage capacity can be determined.

3.3. Load shifting and battery scheduling in factories

In [27] the use of stationary energy storage as a flexibility option in companies is investigated. Among other things, lithium iron phosphate batteries are evaluated to reduce peak loads in small and medium-sized enterprises. Isolated and considered only for this single application, the investment shows no profitability.

Some approaches utilize simulation algorithms to reduce dependence on the power grid through the energetic flexibilization of production systems. For this purpose, [43] mainly uses indirect energy stores in the form of buffers or warehouses for (intermediate) products, while [44] examines battery storage.

[45] uses sequential planning in the form of MILP to improve productivity and synchronize self-generation and loads of order processing. [46, 47] develop an evolutionary algorithm to lower peak loads as well as the amount of required final energy through the appropriate machine layout planning. These studies also achieve a decrease in emissions by saving on the primary energy demand. Battery storage is not considered.

A concept for short-term, energy-oriented production control with situational load adaptation is designed by [48, 49]. With the aim of synchronizing the production load with volatile self-generation, electrical energy is treated as a limited production capacity. A key part of the program is demand monitoring based on information management.

[18, 50] develop a holistic methodology for energy supply-oriented order planning. MILP generates an exact solution in quantity planning, while after that, heuristic methods are used for order planning and tested in a case study. Energy storage as a flexibility option is not regarded.

To solve a flexible job-shop scheduling problem (FJSP), [51] utilize a non-linear mixed-integer optimization. The sum of energy costs under variable prices is minimized plus the sum of the individual orders' completion time weighted with penalty costs. Controllable generators, PV systems and a stationary energy storage are added in a model extension. The accuracy of the model is limited to an hourly observation; a peak load limitation is not depicted.

In summary, in the area of grids, DSM is discussed in almost all cases, including a time-of-use concept. The interactions between variable electricity prices and the load-shifting potential of consumers are examined with the goal of cost and peak demand minimization. Battery storage is mainly used in households, mostly in combination with a PV system to increase self-consumption. The adequate dimensioning of energy storage systems is rarely determined methodically.

In the area of factories, a main focus is on flexible loads due to the high energy consumption of industrial production processes. Battery storage, however, is rarely considered. The greatest research potential is the combination of both flexible loads as well as energy storage.

4. Approach

4.1. Overview and assumptions

The market prices for the energy supply of manufacturing companies are usually known one day in advance in 15-minute periods (day-ahead market). Likewise, the consumption quantity of the considered company is transmitted to the respective energy producer every 15 minutes. From this, it can be derived that there is a partially discrete problem in determining the energy costs for the optimal use of battery storage in a production system. In order to solve this problem, a “Mixed-Integer Linear Programming”-approach (MILP) is chosen in this contribution that was solved with the Branch-and-Bound function in Matlab. This method is a flexible technique that provides an accurate solution to many problems in the field of production engineering.

The simulation shall be used as an evaluation of the optimization as shown in [52]. For this purpose, the simulation model from [26] is modified in such a way that instead of the stochastic storage capacity by electric vehicles, a stationary battery is depicted. This should validate the limitations of modeling the battery within the optimization model and other assumptions made.

According to [53], three types of battery models exist: multidimensional physical-chemical, electrical spare circuit and mathematical black box models. Accuracy and complexity decrease in the order given. For operational planning, technical details can be neglected, and a black box model is sufficient. Thus, in the optimization, charging and discharging are supposed to be linear processes. Furthermore, the amount of stored energy at the start and at the end shall be the same. Inspired by the categorization in [35], a power-shiftable and a time-shiftable production process are considered.

With regard to the power-shiftable process, it is assumed that there is a sufficiently large stock so that its daily energy consumption can be planned freely within 24 hours. In the time-shiftable process, there are several jobs to be scheduled on a machine. These jobs have to be processed in the planning horizon: a 24-hour day.

4.2. Optimization model

The nomenclature used in the optimization model is shown in Table 1. For the sake of clarity, parameters begin with capital letters whereas decision variables start with lowercase letters.

Table 1. Overview of sets, parameters and variables used in the model.

Sets	Description	
<i>Periods</i>	Quarter hours of the planning horizon defined as $\{1, 2, \dots, P\}$	
<i>Jobs</i>	Jobs to be processed on a machine defined as $\{1, 2, \dots, J\}$	
Parameters	Description	Unit
$Cap^{battery}$	Total usable capacity of li-ion battery	kWh
Max^{charge}	Maximum amount of energy to charge per period (pp.)	kWh
$Max^{discharge}$	Maximum amount of energy to discharge pp.	kWh
η^{charge}	Charge efficiency of li-ion battery	
$\eta^{discharge}$	Discharge efficiency of li-ion battery	
Soc^{start}	State of charge of the battery in the first period	kWh
$DmdPS$	Daily energy demand of power-shiftable process	kWh
$MaxPS$	Consumable energy by power-shiftable process pp.	kWh
$Time_j$	Processing time of job j in periods	
$Dmd_{j,q}$	Energy demand of job j in period q since started	kWh
$Price_p$	Electricity price (day-ahead market) in period p	€/kWh
$FeedInTar$	Feed-in tariff for feed-in electricity into the grid	€/kWh
$PeakLoad$	Limit for the annual peak load	kW
$GenPV_p$	PV generated electricity in period p	kWh
$LoadFix_p$	Unalterable load in period p	kWh
$PerLength$	Duration of one period (quarter of an hour)	h
C^{max}/C^{soc}	Coefficients for less amount of energy to charge pp. depending on the current state of charge (SOC)	
Variables	Description	Unit
$charge_p$	Amount of energy to charge the battery in period p	kWh
$discharge_p$	Discharged energy from the battery in period p	kWh
$charging_p$	1, if charging battery in period p; 0, otherwise	
soc_p	State of charge (SOC) of the battery in period p	kWh
$loadPS_p$	Load of the power-shiftable process in period p	kWh
$loadTS_p$	Load of the time-shiftable process in period p	kWh
$start_{j,p}$	1, if processing job j starts in period p; 0, otherwise	
buy_p	Electricity bought from day-ahead market in period p	kWh
$sell_p$	Grid feed-in in period	kWh

The objective function is to minimize the costs for purchasing energy from the grid minus remuneration for fed energy:

$$\text{Minimize} \sum_{p \in \text{Periods}} (Price_p \cdot buy_p - FeedInTar \cdot sell_p)$$

Constraints (1) to (6) describe the lithium-ion battery module. (1) and (2) set a maximum for the charged or discharged amount of energy per period based on the charging or discharging power. The variable $charging_p$ implicitly ensures that each period the battery can be either charged or discharged:

$$charge_p \leq Max^{charge} \cdot charging_p \quad p=1, \dots, P \quad (1)$$

$$discharge_p \leq Max^{discharge} \cdot (1 - charging_p) \quad p=1, \dots, P \quad (2)$$

In (3), the SOC of the battery is determined based on the previous period depending on the energy quantity charged or discharged. (4) gives the SOC a defined initial value, while (5) guarantees that at least the initial SOC is reached after the last period. (6) sets the battery capacity as the SOC's maximum:

$$soc_p = soc_{p-1} - discharge_{p-1} + \eta^{charge} \cdot charge_{p-1} \quad p=2, \dots, P \quad (3)$$

$$soc_1 = Soc^{start} \quad (4)$$

$$soc_p - discharge_p \geq Soc^{start} \quad (5)$$

$$soc_p \leq Cap^{battery} \quad p=1, \dots, P \quad (6)$$

The following constraints define the degrees of freedom of movable production loads. The sum of the consumed energy of the power-shiftable process must reach the daily demand in (7), with the amount of intake per period being limited in (8):

$$\sum_{p \in Periods} loadPS_p \geq DmdPS \quad (7)$$

$$loadPS_p \leq MaxPS \quad p=1, \dots, P \quad (8)$$

The time-shiftable load per period equals the energy demand of the job currently being processed depending on when the job started. For this, in (9) the previous periods are considered within the processing time of each job. If the job has been started during these periods, its energy consumption is counted:

$$loadTS_p = \sum_{j \in Jobs} \sum_{q=1}^{\min(p, Time_j)} Dmd_{j,q} \cdot start_{j,p+1-q} \quad p=1, \dots, P \quad (9)$$

(10) ensures that each job is started exactly once by the latest time from which it can be fully processed:

$$\sum_{p=1}^{P+1-Time_j} start_{j,p} = 1 \quad j=1, \dots, J \quad (10)$$

Only one job can be processed in the same period on the machine. So, in the sum in (11), all previous periods are taken into account in which a job could have been started and still would be processed in the current period:

$$\sum_{j \in Jobs} \sum_{q=1}^{\min(p, Time_j)} start_{j,p+1-q} \leq 1 \quad p=1, \dots, P \quad (11)$$

Electricity supply via the grid must not exceed the peak load limit in any period. The limitation of the peak load is usually specified in kW. This is why it has to be multiplied by the period length for comparison with the variable buy_p in (12):

$$buy_p \leq PeakLoad \cdot PerLength \quad p=1, \dots, P \quad (12)$$

(13) establishes an energy balance: input must equal the output of energy in each period:

$$GenPV_p + \eta^{discharge} \cdot discharge_p + buy_p = charge_p + loadPS_p + loadTS_p + LoadFix_p + sell_p \quad p=1, \dots, P \quad (13)$$

Finally, non-negativity conditions (14) and value ranges for binary variables (15) are listed below:

$$charge_p, discharge_p, soc_p, loadPS_p, loadTS_p, buy_p, sell_p \geq 0 \quad p=1, \dots, P \quad (14)$$

$$charging_p, start_{j,p} \in \{0,1\} \quad j=1, \dots, J \quad p=1, \dots, P \quad (15)$$

To model the battery closer to reality charging in the area of a high state of charge can be limited more by an additional constraint (16). Through the used simulation the coefficients could be determined suitably as $C^{max} = 2$ and $C^{soc} = 0.25$:

$$charge_p \leq C^{max} \cdot Max^{charge} - C^{soc} \cdot soc_p \quad p=1, \dots, P \quad (16)$$

4.3. Application

The model is exemplary applied with data from a medium-sized company that uses a plant for nitrogen production. Since nitrogen can be stored well, this system meets the specifications of the power-shiftable process. Furthermore, a laser cutting machine is in use. This represents a time-shiftable process with a load profile subdivided into different jobs of various lengths. The company has self-generation through photovoltaics of around 290 MWh per year. The use case data is based on power measurements of various consumers and order data to illustrate the production restrictions.

A li-ion battery with a capacity of 75 kWh and a maximum charging power of 49 kW is in use, which means the amount of energy to be charged in one period is limited to 12.25 kWh. This scale seems adequate due to the energy consumption of the company. To reduce deviations from reality by assuming linear charging in the model, usable capacity is lowered to 70 kWh and the limit for charged energy is set to 10 kWh. Charge and discharge efficiency are set to 0.95, as in [27]. For the energy purchase, the day-ahead prices of a Wednesday in October 2018 were used. In each case, taxes according to [54] and the network charge from [55] are added. Without battery use and flexible loads, the energy costs amount to 125 €.

The optimization of load and battery storage scheduling results in energy costs of 105 €. This represents a cost reduction of around 15 percent compared to the original electricity procurement costs of the company on the exemplary day. Furthermore, the limit for peak load could be cut in half from the initial 140 kW to 70 kW in the specific use case. With a permanent lowering of the annual peak load, additional cost savings through lowered network charges could be achieved.

5. Conclusion and outlook

The presented approach is suitable for the operative production planning of manufacturing companies that have identified flexibility measures and want to use them cost-effectively in combination with an energy storage system. By adding further functionalities, it can be extended to feasible methods for different applications.

An example of this are additional constraints regarding the dependencies and restrictions of different orders. This enables the modeling of even complex production processes. In addition to the described order-related measures, flexible loads can be supplemented at the machine level. The inclusion of potential production risks makes it possible to schedule battery capacity as a buffer for unexpected deviations in ongoing operation. The planning of controllable generation, for example, by a combined heat and power plant, can also be added in the form of generation-side flexibility. The further development of electromobility can prove to be interesting if the aforementioned vehicle-to-factory approach finds practical application. The available storage potential can then be differentiated between stationary and mobile storage and, for example, coordinated by a supplementary simulation.

Acknowledgements

The authors gratefully acknowledge the financial support of the Kopernikus-project “SynErgie“ by the Federal Ministry of Education and Research (BMBF) and the project supervision by the project management organization Projektträger Jülich.

References

- [1] United Nations, 2015. *Adoption of the Paris agreement*.
- [2] Deutscher Bundestag, 2016. Klimaschutzplan 2050: Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung, Unterrichtung durch die Bundesregierung
- [3] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2019. *Kommission „Wachstum, Strukturwandel und Beschäftigung“: Abschlussbericht*.
- [4] Deutsche Energie-Agentur, 2014. dena-Studie Systemdienstleistungen 2030. Sicherheit und Zuverlässigkeit einer Stromversorgung mit hohem Anteil erneuerbarer Energien
- [5] Palensky, P., Dietrich, D. Demand Side Management: Demand Response, Intelligent Energy Systems, and Smart Loads, in *IEEE Trans. Ind. Inf.* 7 (3), 381-338.
- [6] Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V., 2017. *Energieverbrauch in Deutschland im Jahr 2016*.
- [7] Rösch, M., Brugger, M., Braunreuther, S., Reinhart, G. Klassifizierung von Energieflexibilitätsmaßnahmen, in *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb ZWF*, p. 567.
- [8] Gebbe, C., Hilmer, S., Götz, G., Lutter-Günther, M. et al., 2015. Concept of the Green Factory Bavaria in Augsburg, in *The 5th Conference on Learning Factories*.
- [9] Simon, P., Roltsch, F., Glasschröder, J., Reinhart, G., 2017. Approach for a Potential Analysis of Energy Flexible Production Systems, in *The 50th CIRP Conference on Manufacturing Systems*, p. 580.
- [10] Roth, S., Thimmel, M., Fischer, J., Schöpf, M. et al., 2018. Simulation-based analysis of energy flexible factories in a regional energy supply system, in *Procedia Manufacturing 33 2019*
- [11] Graßl, M., 2015. *Bewertung der Energieflexibilität in der Produktion*.
- [12] Schuh, G., Stich, V., 2012. *Produktionsplanung und -steuerung 1: Grundlagen der PPS*, 4th edn. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [13] Wiendahl, H.-P., 2010. *Betriebsorganisation für Ingenieure*, 7th edn. Hanser, München.
- [14] Dufloy, J.R., Sutherland, J.W., Dornfled, D., Herrmann, C. et al. Towards energy and resource efficient manufacturing: A processes and systems approach, in *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, p. 587.
- [15] Müller, E., Engelmann, J., Löffler, T., Strauch, J., 2013. *Energieeffiziente Fabriken planen und betreiben*.
- [16] Bank, L., Rösch, M., Unterberger, E., Roth, S. et al., 2019. Comparison of Simulation-based and Optimization-based Energy Flexible Production Planning, in *Procedia CIRP 81 2019*
- [17] Schuh, G., Stich, V., 2012. *Produktionsplanung und -steuerung 2: Evolution der PPS*, 4th edn. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [18] Keller, F., Schultz, C., Braunreuther, S., Reinhart, G. Enabling Energy-Flexibility of Manufacturing Systems through New Approaches within Production Planning and Control, in *49th CIRP Conference on Manufacturing Systems 2016*.
- [19] Günther, H.-O., Tempelmeier, H., 2012. *Produktion und Logistik*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- [20] Sterner, M., Stadler, I., 2017. *Energiespeicher: Bedarf, Technologien, Integration*.
- [21] Mohammadi-Ivatloo, B., Jabari, F., 2018. *Operation, Planning, and Analysis of Energy Storage Systems in Smart Energy Hubs*. Springer International Publishing AG.
- [22] Deutscher Industrie- und Handelskammertag, 2018. *Akzeptanz in der Wirtschaft schwindet: IHK-Energiewende-Barometer 2018*, Berlin.
- [23] Betz, J., Walther, L., Lienkamp, M. Analysis of the Charging Infrastructure for Battery Electric Vehicles in Commercial Companies, in *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), Redondo Beach, CA, USA*.
- [24] M. Aziz, T. Oda, A. Morihara, T. Murakami, N. Momose, Editors, 2014. *Utilization of EVs and their used batteries in factory load leveling*. ISGT 2014
- [25] Roth, S., Klement, T., Braunreuther, S., Reinhart, G. 2018. Vehicle-to-Factory: Eine Potenzialanalyse zur Nutzung der Speicher von Elektromobilen im industriellen Umfeld, in *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 113 (9)*, p. 565-570.
- [26] Roth, S., Spitzer, S., Braunreuther, S., Reinhart, G., 2019. Modeling and simulation of electric vehicles as battery storage in an energy flexible factory, in *11. Internationale Energiewirtschaftstagung IEWT*, Wien.
- [27] VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (VDI ZRE), 2018. *Ökologische und ökonomische Bewertung des Ressourcenaufwands: Stationäre Energiespeichersysteme in der industriellen Produktion*.
- [28] Matzen, F., Tesch, R., 2017. *Industrielle Energiestrategie: Praxishandbuch für Entscheider des produzierenden Gewerbes*.
- [29] Sethi, A.K., Sethi, S.P., 1990. Flexibility in manufacturing: A survey, in *The International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, p. 289.
- [30] Hartmann, N., Thomsen, J., Wanapinit, N., 2018. Using demand side management and CHP in renewable dominated decentral energy systems: a case study 33, p. 193.
- [31] Mahmoud, M.S., AL-Sunni, F.M., 2015. *Optimal Energy Management, in Control and Optimization of Distributed Generation Systems*, Springer International Publishing, Cham, p. 159.
- [32] Zheng, R., Xu, Y., Chakraborty, N., Lewis, M. et al., 2015. Demand Management with Energy Generation and Storage in Collectives, in *Outlooks and Insights on Group Decision and Negotiation*, Springer International Publishing, Cham, p. 369.
- [33] Gao, B., Liu, X., Wu, C., Tang, Y., 2018. Game-theoretic energy management with storage capacity optimization in the smart grids 6, p. 656.
- [34] Ahmad, J., Abrar, M., 2017. Demand Side Management Based Optimal Energy Management Technique for Smart Grid 41, p. 81.
- [35] Aimal, S., Parveez, K., Saba, A., Batool, S. et al., 2018. Energy Optimization Techniques for Demand-Side Management in Smart

- Homes, in *Advances in Intelligent Networking and Collaborative Systems*, Springer International Publishing, Cham, p. 515.
- [36] Kirchsteiger, H., Rechberger, P., Steinmaurer, G., 2016. Cost-optimal Control of Photovoltaic Systems with Battery Storage under Variable Electricity Tariffs 133, p. 371.
- [37] Müller, J., März, M., Mauser, I., Schmeck, H., 2016. Optimization of Operation and Control Strategies for Battery Energy Storage Systems by Evolutionary Algorithms, in *Applications of evolutionary computation: 19th European conference, EvoApplications 2016. Porto, Portugal*, Springer, Cham, Heidelberg, p. 507.
- [38] Giordano, F., Ciocia, A., Di Leo, P., Spertino, F. et al. Self-Consumption Improvement for a Nanogrid with Photovoltaic and Vehicle-to-Home Technologies, in *IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering*.
- [39] Kaschub, T., 2017. *Batteriespeicher in Haushalten unter Berücksichtigung von Photovoltaik, Elektrofahrzeugen und Nachfrigesteuerung*. Karlsruhe.
- [40] Arun, S.L., Selvan, M.P., 2018. Smart residential energy management system for demand response in buildings with energy storage devices 14, p. 944.
- [41] Gruber, J.K., Prodanovic, M., 2014. Two-stage Optimization for Building Energy Management 62, p. 346.
- [42] Kaji, K., Zhang, J., Tanaka, K., 2013. Energy Management Using Storage Batteries in Large Commercial Facilities Based on Projection of Power Demand, in *Proceedings of the Institute of Industrial Engineers Asian Conference 2013*, Springer Singapore, Singapore, p. 1165.
- [43] Beier, J., 2017. *Simulation Approach Towards Energy Flexible Manufacturing Systems*. Springer International Publishing, Cham.
- [44] Zafirakis, D., Elmasides, C., Sauer, D.U., Leuthold, M. et al. The multiple role of energy storage in the industrial sector: Evidence from a Greek industrial facility, in *8th International Renewable Energy Storage Conference and Exhibition, IRES 2013*.
- [45] Agha, M.H., 2009. *Integrated Management of Energy and Production: Scheduling of Batch Process and Combined Heat & Power (CHP) Plant*.
- [46] Rager, M., 2008. *Energieorientierte Produktionsplanung: Analyse, Konzeption und Umsetzung*. Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler / GWV Fachverlage GmbH Weisbaden, Wiesbaden.
- [47] Rager, M., Gahm, C., Denz, F., 2015. Energy-oriented scheduling based on Evolutionary Algorithms 54, p. 218.
- [48] Schultz, C., Sellmaier, P., Reinhart, G., 2015. An Approach for Energy-oriented Production Control Using Energy Flexibility 29, p. 197.
- [49] Schultz, C., 2018. *System zur energieorientierten Produktionssteuerung in der auftragsbezogenen Fertigung*.
- [50] Keller, F., 2018. *Methodik zur energiebezugsorientierten Auftragsplanung*.
- [51] Moon, J.-Y., Park, J., 2014. Smart production scheduling with time-dependent and machine-dependent electricity cost by considering distributed energy resources and energy storage.
- [52] März, L., Krug, W., Rose, O., Weigert, G., 2011. *Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik: Praxisorientierter Leitfaden mit Fallbeispielen*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- [53] Keil, P., Jossen, A., 2012. Aufbau und Parametrierung von Batteriemodellen, in *19. DESIGN & ELEKTRONIK-Entwicklerforum Batterien & Ladekonzepte*.
- [54] BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. BDEW-Strompreisanalyse Januar 2019: Haushalte und Industrie.
- [55] Agora Energiewende, 2016. Entwicklung der Strom-Netzentgelte 2017: Die regionalen Unterschiede nehmen zu.



Development and evaluation of risk treatment paths within energy-oriented production planning and control

Stefan Roth¹ · Vincent Kalchschmid¹ · Gunther Reinhart¹

Received: 18 December 2020 / Accepted: 4 March 2021 / Published online: 14 March 2021
© The Author(s) 2021

Abstract

Production planning and control pursues high delivery reliability and short delivery time of the production system at the lowest possible costs. Especially in energy-intensive industries, energy cost account for a significant amount of manufacturing costs. The consideration of variable electricity market prices using energy-flexibility measures facilitates reduced costs by adapting the load profile of production to an electricity price forecast. However, it also increases the production planning and control system's complexity by additional input variables and possible risks due to the influence of flexibility measures on the production system. In the case of unexpected events, such as failure of machines or faulty materials, it is difficult to adapt the complex production system to the new situation quickly. There is a risk of high additional costs by various causes, such as delays in deadlines or load peaks. Therefore, this paper presents an approach for developing and evaluating risk treatment paths, which include possible combinations of risks and measures for the mitigation of risk effects. The advantage of these paths compared to a situational reaction is that all effects and possible further interactions can be considered and thus overall cost-efficient solutions can be found. The approach is based on the determination of interactions through interpretive structural modelling and the calculation of conditional probabilities using Bayesian Networks. The approach was implemented in MATLAB[®] and applied using real order and energy data from a foundry. The results show that the presented approach enables structured and data-based comparison of risk treatment paths.

Keywords Production planning and control · Energy-flexibility · Risk management · Fault management · Bayesian Networks · Interpretive structural modelling · MATLAB[®]

1 Introduction

Operational production planning and control (PPC) is an area of in-house production planning and includes the tasks of lot size planning, scheduling and sequence planning [1]. The PPC has ambitious goals for the performance of the production system: high delivery reliability and short delivery time, which should be achieved with the lowest possible production costs [2].

In practice, this is still a challenging task for those responsible. According to a study in which almost 100 company

representatives were interviewed, 80% of the participants stated that the amount of information and the level of detail in their PPC systems did not meet the employees' needs. The study also showed that the employees do not rely on their PPC systems' functionality and results in two out of three companies [3].

New approaches for increasing the performance or reducing production costs, therefore, always arise in this area of tension and need to distinguish themselves by high transparency and comprehensibility to gain acceptance and be thoroughly used. With increasingly volatile electricity prices, the reduction of electricity costs by exploiting price effects is set to gain importance in countering rising energy prices in the future [4].

In general, the characteristics of the price effects mentioned depend greatly on present electricity procurement strategies. A portfolio of different electricity products is available for larger and energy-intensive companies, containing long term base blocks, peak blocks and short-term

✉ Stefan Roth
stefan.roth@igcv.fraunhofer.de

✉ Vincent Kalchschmid
vincent.kalchschmid@igcv.fraunhofer.de

¹ Fraunhofer Institute for Casting, Composite and Processing Technology IGCV, Am Technologiezentrum 10, 86159 Augsburg, Germany

spot market products. The deviation from the load that was purchased through these products leads to penalties. Furthermore, load peaks are of particular importance. When calculating the grid charges of companies, the annual maximum load is included. If load peaks exceed the annual maximum load, grid charges can increase drastically [5].

One promising approach is that of energy-flexible production systems, which adapt quickly and efficiently to changes in the energy market by using energy-flexibility measures (EFM), such as the change of job sequence or the interruption of processes [4]. The prerequisite for this is a so-called energy-oriented PPC, which integrates the concept of energy-flexibility into the production system during planning and control tasks [6]. On the one hand, this offers energy-intensive industries in particular the opportunity to save electricity costs without severely restricting the production system's performance. On the other hand, it increases the already high complexity of the PPC by implementing additional energy-related boundary conditions. As a result, production control must quickly make decisions should unexpected events occur, considering the various interactions and effects between action options. Suppose unexpected events occur in an energy-flexible production system. In that case, the systems' electrical load profiles must be considered in addition to logistical target values, because these can lead to high additional costs if there are any deviations from the planned load profile.

In the upper part of Fig. 1, typical faults in the orders are shown. An unplanned follow-up order on machine two results in increased stocks. A fault occurs on machine one, which leads to repair work and a delay in the delivery date

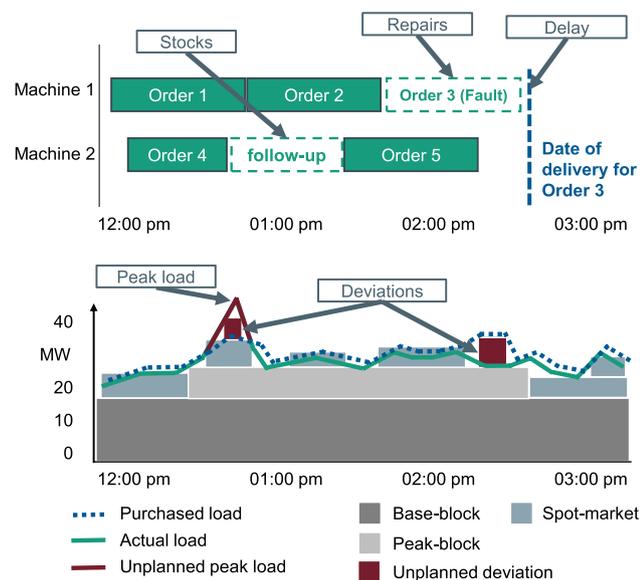


Fig. 1 Impacts of exemplarily unexpected events on logistic goals and load profiles

of the affected order 3. The effects of these faults on the electrical load profile are shown in the lower part of Fig. 1. Machine One's fault has the effect of deviating from the initially purchased load profile, which can lead to penalties. In addition to a deviation, the unplanned follow-up order on machine two causes a load peak, leading to the above-mentioned increased grid charges.

In many cases, the influencing factors and interactions of energy-flexible production systems are thus too complex to find a cost-efficient measure when an unexpected event occurs. This may represent a major obstacle to EFM implementation, since the production system's performance should not be endangered for price advantages on the electricity markets [7, 8]. To avoid restricting the production system's performance by any additional adjustments, companies could therefore decide to only consider logistical goals and capacities in their production planning and not consider fluctuating electricity prices based on forecasts.

Through the risk treatment of a production plan, possible adverse events are excluded beforehand by plan adjustments or measures to compensate for the effects of errors are already known. Thus, this paper presents an approach with which risk treatment paths can be developed and evaluated within the energy-oriented PPC framework. The development of the paths considers that several risks can occur one after the other, with different conditional probabilities and interactions. In this way, it is avoided that suitable measures are used for the first risks with a minor extent of damage, and so, sufficient measures are no longer available for subsequent risks with a significant extent of damage. It also includes the identification of the probability of occurrence of risks, as well as the modelling of possible interactions between risks and measures, and thereby increases the transparency and planning security for the logistical goals.

The state of the art for relevant topics in this study is explained in the following. Section 3 introduces the scientific concept. The approach for development and evaluation of risk treatment paths is introduced in Sect. 4. Its implementation in a MATLAB® tool is explained in Sect. 5. The exemplary application of the approach using the tool is then described in Sect. 6. Conclusions and a preview of possible future developments are presented in Sect. 7.

2 State of the art

The approach presented here for the “Development and evaluation of risk treatment paths within energy-oriented production planning and control” is sought to be embedded in the general environment of energy-oriented PPC, in which the targeted evaluation of risks and measures is to be implemented. As relevant energy-intensive production systems show great complexity and large numbers of possible

risks and measures with often inscrutable entanglements of mutual effects and impacts on risk and measure occurrence, the consideration of tools for modelling of interrelationships and dependencies between risks and measures is necessary. The following sections give an insight into the state of research in these fields of energy-oriented PPC, risk and measure evaluation and the modelling of interrelationships and dependencies.

2.1 Energy-oriented PPC

Keller et al. [6] suggest a medium- and short-term add-on module for the enterprise resource planning system to implement energy-oriented production planning. The result is an energy demand plan that is coordinated with the production plan. Mitra et al. [9] investigate the optimal production planning and control with time-changing energy prices for continuous, energy-intensive chemical industry processes. To do this, they formulate a deterministic, mixed-integer optimisation problem as a model of temporally discrete transitions between states to solve a flexible job-shop scheduling problem. Moon et al. [10] utilise a non-linear mixed-integer optimisation, considering distributed energy resources and energy storage. Rager et al. [11] present an energy-oriented scheduling approach for parallel machine environments, which is based on evolutionary algorithms. The approach focuses on allocating and sequencing production orders on identical parallel machines within a fixed planning horizon. A method for integrated scheduling of batch process and combined heat and power plant is presented by Agha [12]. The discrete time modelling and mixed-integer linear programming-based approach reduce energy costs and harmful gas emissions by optimising the use of cogeneration and more efficient exploitation of utility resources. Schulz et al. [13] developed an approach for considering the three strategies for reducing energy costs: energy efficiency, energy-flexibility and avoiding peak loads. It is based on constructing a mathematical model that considers volatile energy prices and an iterated local search algorithm. Possible additional costs due to the deviation from an originally intended plan are taken into account by Schultz et al. [14] and Rösch et al. [15]. The deviations are responded to with situational measures when they occur, this means that there is no risk treatment with sufficient lead time to avoid risks or to define countermeasures for events. This may lead to actions based on incomplete situation overviews and improper handling with undesired results.

2.2 Evaluation of risks and measures in PPC

Risks are basically described as the product of the likelihood of occurrence and the extent of the damage [16]. There are various approaches to identify and manage risks

in the production system environment. Chauhan et al. [17] show to how risks within the development process of new products can be estimated and compensated with an integrated approach. Niesen et al. [18] provide a tool for online simulation of production processes to identify critical situations before they occur. Geiger and Reinhart [19] show an approach for machine scheduling under consideration of uncertainties. Simon et al. [20] apply four strategies for the risk evaluation of energy-flexibility. The strategy for evaluating the influence of EFM on production risks complements classic risk management with all possible influences of EFM on the identified risks. Klöber-Koch et al. [21] integrate production risks into a classic PPC system to make predictions about the risk situation during planning and take these into account in planning. Therefore, risks and the production system are modelled. The risks are evaluated regarding their mutual effects and their effects on logistical target values. Finally, suitable preventive measures are incorporated into production planning.

In energy-flexible production systems, the general modelling of energy-flexibility is useful for modelling measures. In Schott et al. [22], the aim is to build a generally applicable data model for modelling performance-related flexibility, which allows transferability between different industries and offers the possibility of standardising the description of energy-flexibility.

2.3 Modelling interrelationships and dependencies in complex systems

It is essential to record the structure between risk and measure interactions in complex systems to quantify them. Klöber-Koch et al. [23] use interpretive structural modelling (ISM) to structure risks in production systems. A structural self-interaction matrix (SSIM) is created based on an existing risk inventory. This assigns mutual dependencies and effects to the system elements, i.e., risks, based on expert knowledge in a pairwise comparison. Pfohl et al. [24] and Shakya and Chauhan [25] also use the ISM methodology to model risk interdependencies. Pereira et al. [26] and Daultani et al. [27] use Bayesian Networks to structure risk interdependencies, interactions and dependencies. Bayesian Networks are acyclic graphs made up of nodes and directed arrow connectors, which indicate their dependencies. Pereira et al. [26] also use what is known as an analytic hierarchy process (AHP) to analyse the influence of individual risks. Wu et al. [28] integrate the Bayesian Networks approach into the ISM methodology. The system structure of the identified risks is first generated according to the ISM method and then expanded to include the calculation of conditional probabilities of risk occurrence.

2.4 Need for research

According to the current state of the art, there are several approaches with which a production plan can be drawn up that consider variable prices from electricity exchanges. Approaches to production control show the possibilities for initiating measures to reduce costs depending on the situation in the event of a malfunction. The work on risk management in the production area shows how the risk aversion of planners and possible uncertainties in the planning process can be considered during the planning process. However, the complex origins of energy costs from load peaks and absolute demand quantity deviations and the use of predefined energy-flexibility measures are not subject to the presented approaches for risk treatment in production planning. This is necessary to be able to integrate all the experts involved. In addition to PPC experts, these are, for example, electricity purchasing and energy management. It is another requirement to weigh up the effects on various additional energy-related criteria transparently, such as penalties and increased

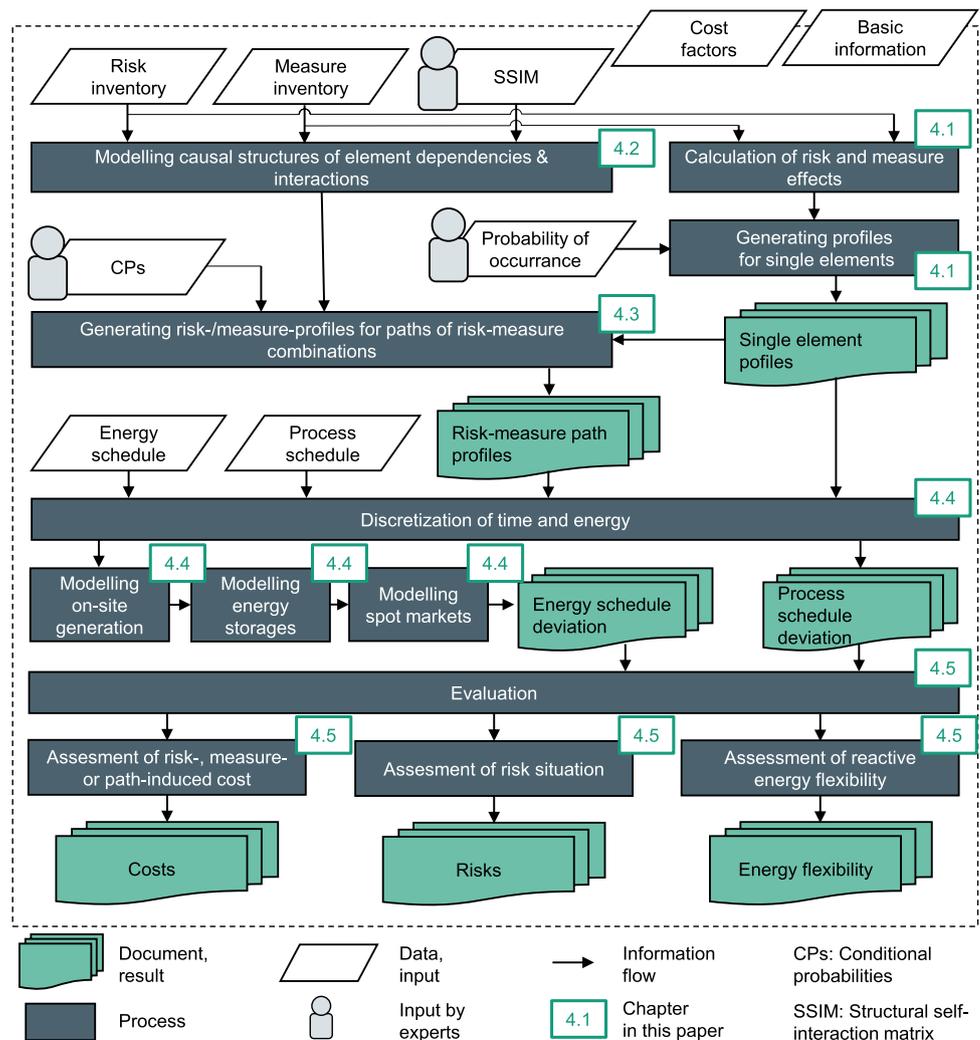
network charges. Therefore, a need for research exists into approaches to risk treatment that operative PPC can apply in the context of energy-flexible production systems.

3 Scientific concept

Figure 2 presents a graphical overview of the approach that is being presented in this paper. It depicts all necessary expert inputs and sources of information, functions and process steps, and the resulting documents and data. The main process steps are:

- The structuring of causal relations in the considered system of risks and measures.
- The parallel calculation of risk and measure profiles for single elements.
- The combination of the first two steps towards identically structured profiles for possible element combinations.
- The discretisation of time and energy.

Fig. 2 Overview over the approach



- The evaluation of the generated information for cost, risk and remaining energy-flexibility.

The approach is limited to electrical energy demand in production systems. Other forms of industrial energy use, such as fossil fuels or gases, are excluded. The overall consideration applies to production stations, such as facilities or production resource units and their respective processes within industrial enterprises. Processes must be formalised to discrete production timetables, including process step time data and electrical power demands to enable direct and quantitative consideration of disturbance effects. In-house experts must be capable of supplying information on interdependencies and interactions within the system of elements and must be able to estimate conditional probabilities according to empirical data or their experience. Energy storage, on-site electricity generation and intraday spot market trade are not considered to be energy-flexibility measures in the strict sense of pertinent literature. They are seen as “third-order periphery” with very little to no manufacturing impact [29] and are therefore modelled separately.

For the presented approach, a risk inventory as well as a list of preventive countermeasures and EFM must be available and cover a specified set of data for all elements, e.g., changes in setup, transport or wait time, average and maximum change of electrical load and additional intralogistics or setup processes. Next to risk and measure inventories, basic information on cost factors, production system target values and energy supply must be available. Also, in the sense of energy-oriented PPC, planned energy schedules for the focused process and the superordinate production unit, e.g., the factory it belongs to, must be presented.

In Fig. 2, the box numbers indicate the section in which the process step is presented in the following part of this paper.

4 Description of the approach

This chapter presents the approach for developing and evaluating risk treatment paths. Section 4.1 presents the evaluation and calculation of risk and measure effects. In Sect. 4.2, the modelling of the causal structures between the elements is being introduced. The hereby generated structure is then being picked up in Sect. 4.3 and complemented to the modelling of risk measure paths. A time and energy-related discretisation is carried out in Sect. 4.4, before the approach is being concluded by evaluating the generated overall risk situation in Sect. 4.5.

In the following, the term “element(s)” is used for the general naming of risk treatment measures (RTMs), EFMs and risks. Furthermore, EFMs are RTMs summarised in the term “measures.” The similar treatment of risks and

measures, which are the opposite, enables their consideration in a uniform and common system that is essential for the approach presented in the following. A “system” is a quantity of identified elements and their significant dependencies and interactions.

4.1 Evaluation and calculation of risk and measure effects

Risks and measures must be known and inventoried (compare Fig. 2) before starting the hereby presented approach, which commences with evaluating and structuring known risks and already identified possible measures derived from them. Risks, in general, might be associated with specific schedule deviations, disruptions in the dimensions of time and all logistic target measures, as well as all sorts of undesired impacts. Measures are generally aimed at the prevention and compensation of risk-induced damage. The identification of risks and RTM can be accomplished by applying creative methods, such as morphological analysis and brainstorming or via collective methods, such as checklists, strengths, weaknesses, opportunities and threats (SWOT) analysis. Furthermore, analytic search methods like bow-tie-analysis, empirical data analysis, fault tree analysis, failure mode and effects analysis (FMEA) and root cause analysis (RCA) can be used [30]. However, these methods are not explained in more detail here, as the approach is applied after identifying individual risks.

As mentioned before, the impact of the identified possible risk events can be quantified by modelling event-related extents of damage and associated probabilities of occurrence. For this, specific information is to be obtained. Based on Refs. [20, 22, 31], risk and measure data from the identified inventories must contain identifiers and variables for specifying the process steps to which the specified elements refer. Also, time-related information, such as activation, deactivation, minimal effect and regeneration durations of elements are required. For quantifying the actual effects on energy-oriented PPC target parameters, risk and measure-induced negative and positive deviations of wait time, transport time, lead time and process start times must be stated for every individual element. PPC target parameters are for example, lead time, capacity, stock or delivery reliability.

Furthermore, impacts of elements on quality, setup and intralogistics processes must be specified via respective variables. Finally, risk or measure-induced maximum and average load change capabilities complete the dataset. In addition to the risk- and measure-specific information, basic data on the production and energy procurement situations are required. For example, the sequence and dependency of processes, order data, and the systems’ electrical energy demand and price forecasts are relevant.

With this information, it is possible to calculate the identified risks' extent of damage and measure impacts. In this approach, risk and measure effects are quantified in the dimensions of selected target variables of energy-flexible production systems. The underlying principle is that individual elements' values can be added to calculate combined extents of damage for risk- measure combinations. Table 1 lists the parameters selected for this purpose:

The time unit (TU) mentioned in Table 1 refers to the smallest specified time slice and prescribes the approach's temporal resolution. For the consideration of energy-oriented production systems, the spot-market trading time-slots of 15 min are an appropriate choice for one TU. Not all parameters that are presented directly in the discrete and absolute dimensions of time, electrical power or energy consumption are mathematically related to target values or overall values from the production system to ensure summability.

Next, the probability of occurrence for single risk events and measures is modelled to conclude a complete risk quantification. According to Ref. [34], damage distributions for individual damages can be described by a random variable with an associated probability distribution. The damage amount can, for example, be related to the maximum damage and thus lies between 0 and 1. Several distribution functions are available and commonly used for this task. For modelling specific damage cases, these distribution functions can be selected and in part be tailored to the distributions of actual use cases by adjusting function parameters. If only the full damage is relevant or even possible in the case of a specific risk occurring, the assignment of a simple probability value can be sufficient. The targeted selection and parameterisation of a distribution can generate a higher number of evaluation options and increase the observation's granularity. However, this also leads to a correspondingly higher effort and knowledge requirement.

As well as risks, RTM should hereafter be modelled as the product of the probability of their occurrence and

their effect. While risk events are regarded as uncertain, the application of RTM and EFM is always considered to be planned and therefore certain in this approach. Hence their probability of occurrence is generally set to the value of 1 (100%). This seemingly unrequired step is justified by the system's feature that states that the probabilities of occurrence of individual elements not only serve to consider the respective singular risk or measure situation, but are also used as starting values for the calculation of probabilities of occurrence of paths that emerge from the considered individual elements. The assignment of a dummy probability of occurrence of 100% is necessary to create compatible structures in the modelling of risks and measures and enable the uniform presentation of risks and measures in the standardised procedure for calculating the probability of occurrence for paths is presented in the following.

After the evaluation of individual elements has been carried out, a systematic quantification of system structures and causality between elements must be provided. The structural aspect of this requirement will be presented in the following section.

4.2 Modelling the causal structure of risks and measures

The methodology of interpretive structural modelling (ISM) is used to structure risk dependencies and interactions by several state-of-the-art-sources in Sect. 2.3. Its advantages are the structured approach, the relatively simple provision of input data and the derivation of complex logical and graphical structures from simple logical relationships with defined tools. Thus, the hereby presented method also applies parts of the ISM methodology for modelling causal structures of risks and measures. The approach aims to generate a graphical representation of dependencies and interactions of objects and to identify relationships [24]. For this, ISM methodology involves a series of defined steps.

Table 1 Parameters of extent of damage

Parameter	Symbol	Unit	Definition
Plan delay	Δt_{plan}	TU	Sum of risk or measure-induced absolute time delay compared to the production plan
Lead time	Δt_{lead}	TU	Absolute change of lead time
Delivery reliability	ΔDR	%	Percentage change of orders delivered within a defined delivery date tolerance [32, 33]
Capacity utilisation	ΔCU	%	Percentage change in the ratio between the average and maximum performance of a working system [33]
Stock	ΔSt	%	Percentage change in stock and circulating inventory in the production system [33], here: related to target stock
Quality	ΔQ	%	Percentage change in the degree to which given product quality requirements are met [15]. Here: change of the proportion of good parts in the entire production system
Load	ΔP_{avg}	kW	Absolute average load change
Energy demand	ΔW	kWh	Absolute change in energy consumption
Emissions	ΔE	t _{CO2}	Absolute change in energy consumption-related emission of CO ₂

Firstly, all relevant elements in the system under consideration must be listed. When applying the ISM methodology to systems of risks, RTMs and EFMs, this step identifies risks and measures. A structural self-interaction matrix (SSIM) is generated based on the recorded portfolio. Here, the identification letters V, A, X and O are entered in cells of pairwise element comparison and thus formalise influence between the system elements. Influence in this step of the method means any form of dependence, mutual exclusion or targeted and un-targeted effect relationship between the system elements of risks RTM and EFM. An example SSIM and the meanings of the appropriated code letters according to Refs. [24, 25, 35] are listed in Fig. 3.

From the basic SSIM, the binary initial reachability matrix (IRM) is generated using the transformations rules depicted in Fig. 4.

The IRM is then transferred to the final reachability matrix (FRM) via transitivity conditions [24, 25, 35]. Transitivity in this context is the consideration of connections of indirectly linked logical elements. Subsequently, nodes A and C are to be equally connected by the value of one in the respective FRM cell if, in the IRM, a node A is directly connected to another node B, and node B is directly connected to a third node C [35, 36].

At this stage of the approach, further ISM-associated steps are omitted. The underlying goal of structuring the system of interactions between risks, RTM and EFM is

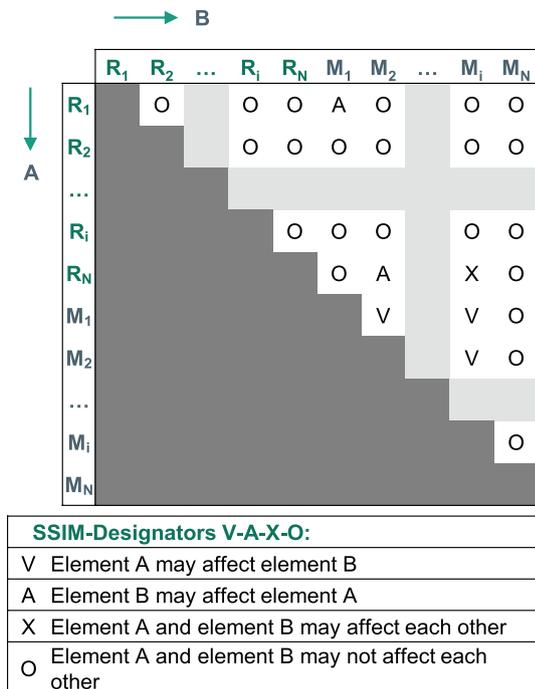


Fig. 3 Structural self-interaction-matrix (SSIM)

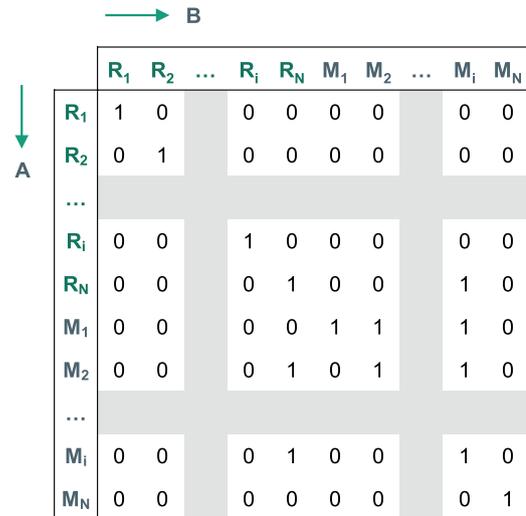


Fig. 4 Initial reachability matrix (IRM)

to derive complex paths of element combinations from the simple, paired indication of dependencies and interactions in the SSIM. The further course of the approach presented here is based on the FRM. It can be understood as an adjacency matrix extended by indirect element connections. Adjacency matrices are matrices that formalise the topology of direct relations of elements within systems of complex interactions by binary variables [37]. By applying the transitivity concept to the IRM, the adjacency matrix is extended by information on indirect interactions. The FRM then contains all information that is necessary to derive paths by specifying paired connections. The matrix representation is transformed into a directed graph by representing the system elements as nodes and connecting the nodes with directed edges for each "1" entry in the FRM. This digraph is cyclic and therefore contains loops. Paths that are extracted directly from this representation are endless and repetitive. The graph must be reduced to the essential compounds to eliminate these properties. For this purpose, all the connectors that do not increase the accessibility of individual elements are removed by transitive reduction. The repeated appearance of elements in extracted paths is thus eliminated. The result of the

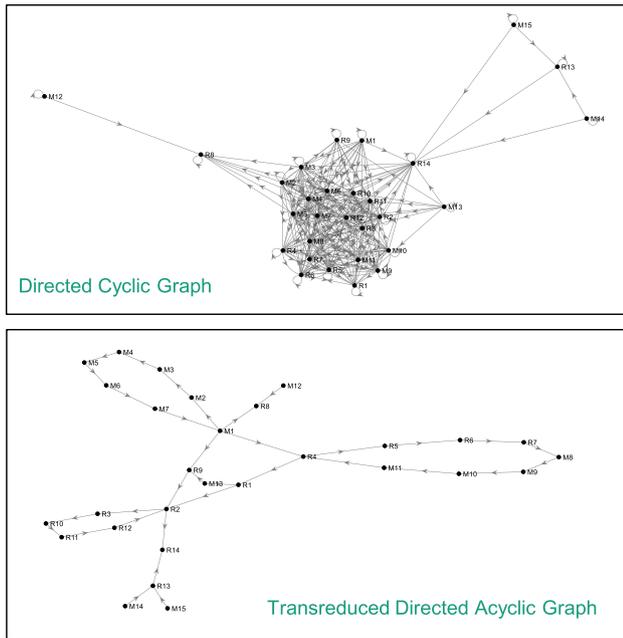


Fig. 5 Directed cyclic graph and transreduced directed acyclic graph (DAG)

transitive reduction is a graph that only shows the most direct paths of the original cyclic graph without repetitions of elements and loops, but with the same accessibility.

Figure 5 displays the graphs for an exemplary system of 14 risks and 15 measures in cyclic (top) and acyclic form (bottom):

This form of visualisation considerably simplifies the understanding of the path term, compared to a binary matrix [37] and makes it possible to visually track paths.

By transferring simple, paired information into a complex visual model of paths, the framework for continuing risk and measure modelling by applying it to combinations of individual elements has been provided. Below, the generated structural framework is used for modelling risk-measure paths. It is worth mentioning that the presented procedure considers all possible combinations of elements according to the SSIM specifications to ensure complete consideration of the possible interactions down to the last detail.

After Sect. 4.3, the procedure of setting up the required system elements and their structure provides a framework for modelling element interactions in the following.

4.3 Modelling of risk measure paths

Based on the structuring of element interrelations, the probability of occurrence and the indirect damage impact of the path occurrence are modelled in this section. The Bayesian Network theory is applied for path occurrence probabilities.

4.3.1 Modelling probability of occurrence for paths via Bayesian Network theory

The Bayesian Network theory offers a method for transferring the presented structural model into a stochastic model of probabilities of occurrence for risk measure paths by providing a framework for modelling uncertainty [38] and representing objects in uncertainly defined fields [26]. In the directed acyclic graph (DAG) previously presented, elements of the system under consideration are represented as a set of variable nodes and directed connectors between the variables in Bayesian Networks [39]. Nodes represent random variables and edges represent the causal relationships between them [40]. Each variable has a finite number of possible conditions. The acyclic structure implies that conditional independence exists between specific nodes. If two nodes are not in a closed circle, conditional independence can be assumed [41].

The determination of probabilities of occurrence of paths in Bayesian Networks is based on conditional probabilities theory [39, 41]. Dependencies, interactions and exclusions of variables are described by the probability of occurrence of the state of a random variable depending on the state of the preceding variable [26, 39]. For each node in the DAG, a conditional probabilities distribution must be defined, for example, in the form of tables [39, 41] (see Fig. 6). For the overall probability of a path, the conditional probabilities of all included elements are multiplied. If, for example, two elements A and B are present in the considered system of

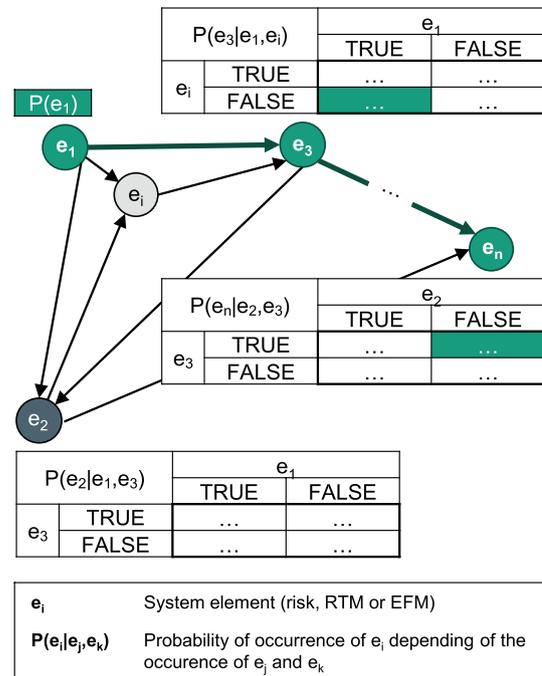


Fig. 6 Example for a Bayesian Network

single elements, where element A excludes element B, the value “0” must be chosen as element B’s probability depending on element A: $P(B | A) = 0$. If the target element of a considered pairing is to be explicitly applied to the source element, e.g., as it is the case for RTM application, its probability must be set to the value “1”. Generally, conditional probabilities between 0 and 1 (0...100%) are possible.

Based on the FRM, all the possible source nodes can be determined for each possible target node. The extracted combinations of source and target repeatedly appear in different arrangements of a relatively manageable number.

Further simplifications can be made to reduce the effort of defining conditional probabilities for targets depending on sources in complex systems: the number of possible states of all source and target nodes is limited to two. State “1” means that an element has occurred or has been implemented. State “2” means the opposite. This implies that a total of four conditional probabilities can be defined for target nodes with two source nodes. Since the calculation of probabilities of occurrence of paths is always based on the assumption of the occurrence or the use of the respective preceding path element, only state “1” is relevant. This fact reduces the parameterisation effort for the experts significantly. For example, for the digraph presented in Fig. 5, twenty-four possible combinations would have to be parametrised. The simplifications presented here comply with the so-called NOISY-OR approach to the parametrisation of Bayesian Networks [42].

4.3.2 Modelling damage impact of path occurrence

The reason for aiming to ensure the addability of target parameters for risk extent of damage or measure impact is the calculation of impacts in the same dimensions for paths of possible risk-measure combinations. As Fig. 7 shows, with each partial step of a path, arrays of the extent of damage of the path elements are added up successively.

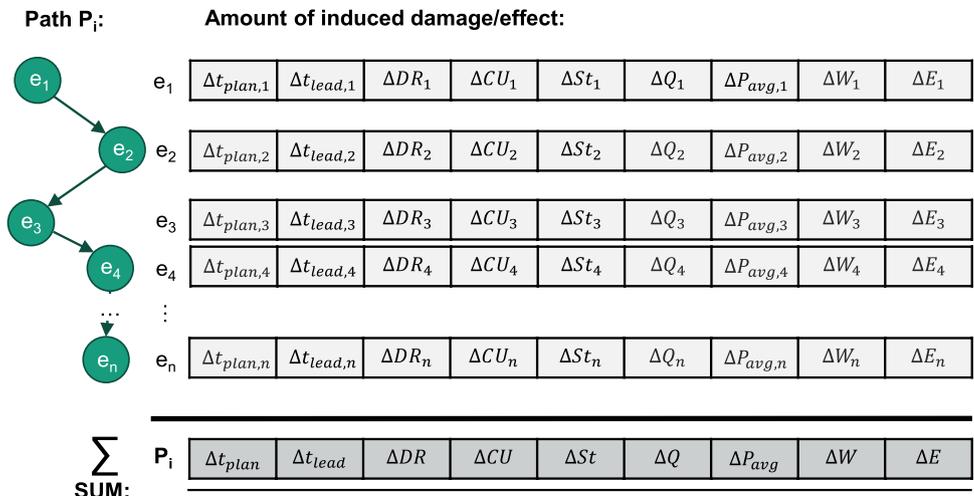
The development of the extent of damage of a path is always traceable at any time and for any stage of composition. Based on the accumulation of target parameters, the situation of all the element combinations can be evaluated compactly and uniformly by re-deriving information from them. With the probability of occurrence, an individual profile can be created for each element and path from the presented format (see Fig. 7). The element-centred part of the approach presented so far must now be re-related to the determining dimensions in the context of planning in energy-oriented PPC, which are time and energy.

4.4 Time and energy-related discretisation

In addition to the presentation of the causal structure of interactions and interdependencies in the system of risks and measures, their effects must be classified in terms of time, since the specific deviations of the elements were determined independently of the specific point in time in the previous steps of the approach. To locate risk- or measure-induced effects in the production plan, risks and measures must be related to a particular process step. If the process step affected by a risk is known, the earliest time at which the risk may occur can be determined. This is also necessary for measures, because the time of the processes affected by the measures must be considered. In general, the discretisation is always based on a planning period whose length t is defined in the input. Figure 8 depicts an exemplary planning period and its subdivision for one machine. The orders are scheduled for the machine with buffers. Every order contains a specified number m of products that are displayed as units. For every unit, the lead time is split according to Ref. [2]. Time-related effects of system elements are generally considered as effects on these time components.

When specifying points in time, the entire event always refers to the timeline specified in the input process plan.

Fig. 7 Amount of induced damage and effects summed up for a path



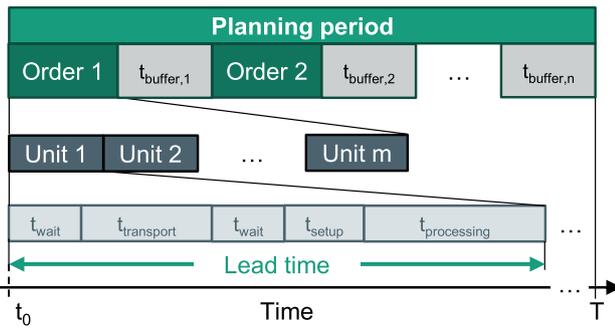


Fig. 8 Planning period and its subdivision

The start time of the planning period enables the conversion of periods of time, specified for the effects of measures and risks into absolute times by acting as a reference point. The predicted timestamp of risks and measures introduced in this way precisely determines the timing of all possible damage or measure effects. Risks in particular and production engineering interventions for risk compensation or EFM, can be added directly to the planned load profile at the appropriate point of time.

EFMs that do not consist of changes in process parameters or manipulated variables of the production system are referred to as the energy-flexibility of the production system's periphery according to the corresponding assumption in Sect. 4.2. These measures are not to be included in the general term and catalogue of measures, as they are not based on adaptations inside the production system, such as changes in order sequence or processing flows. Peripheral energy-flexibility includes the use of energy storage and in-house generation facilities, as well as the short-term procurement of electricity through intraday spot market trades. Their possible compensatory effects on the changed load profile of the process and the company's overall load profile depend on the input parameters provided. The compensation of load curve deviations by the means mentioned is then realised automatically. Figure 9 depicts the process of time-discrete consideration of risk and measure impact and the effects of third-order periphery EFMs on the load profile that is carried out for every single possible path identified:

4.5 Evaluation of the overall risk situation

After modelling risk, RTM and EFM, as well as paths of their possible combinations within the considered system, the respectively present overall risk situation is to be evaluated. During the following evaluation, the risk and measure-induced changes of cost and the corresponding changes in energy-flexibility and overall risk situation are to be assessed and quantified. Conflicting objectives between the three target figures must be considered by production managers when

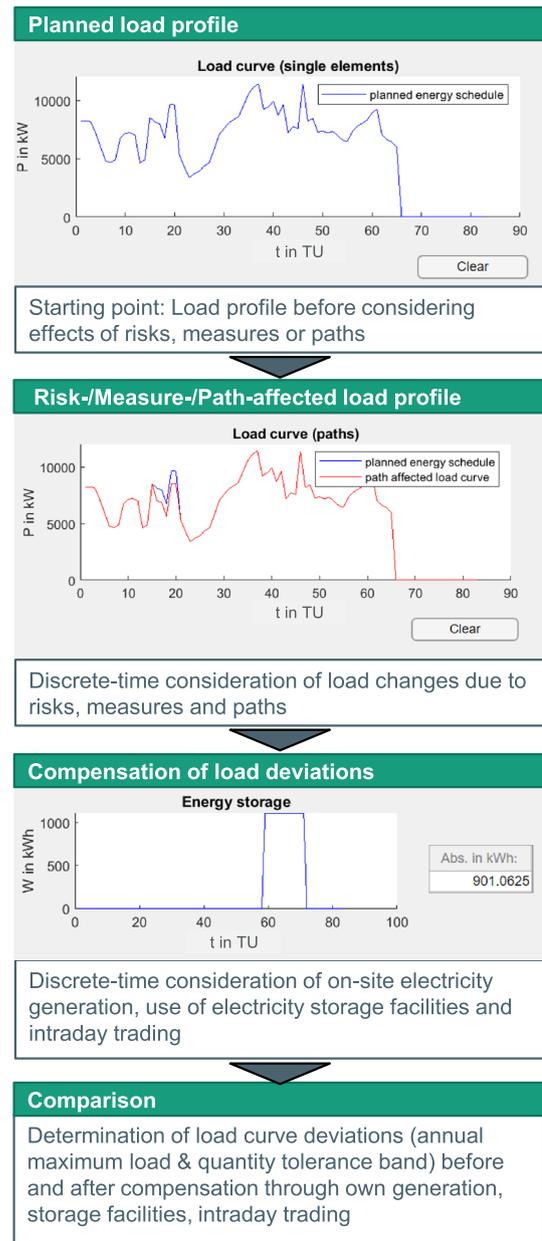


Fig. 9 Process of time discrete consideration of risk and measure impact

deciding on preventive risk compensation during production planning.

4.5.1 Costs

An appropriate cost model, which can be integrated into the presented methodology and is generally transferable to energy-flexible production systems, must be set up to determine the risk and measure-induced cost changes. To this end, the approach presented adds refinements to the general

cost model presented in Ref. [30], which is based on Refs. [43, 44].

To consider the influence of risks, measures and their combinations on a production system, only the resulting changes in the cost situation are relevant for monetary quantification. Accordingly, costs are understood as risk- and measure-induced additional costs or cost reductions.

Following Ref. [43], the first level of classification in the cost model is divided into event and infrastructure costs. The latter corresponds to the cost changes that result from the use of production peripherals and electricity trading. Variable measure costs are subdivided into costs for load balancing by use of energy storage, plant operation and potential primary energy costs for on-site electricity generation and costs for short-term trading on the intraday spot market. In the context of this paper, these costs are understood as costs of peripheral energy-flexibility. The costs for actual measures, namely production-internal risk compensation and energy-flexibility measures, since they are assigned to components of paths, are considered event costs. As they are presented in Ref. [31], fixed-measure costs are not relevant in the system.

Event costs include all the costs that can arise in the production system due to risk occurrence or preventive use of EFM and RTM within the production system’s scope.

Event costs are further subdivided into production, logistics and delay costs. Delay costs arise from late or early delivery, which is fined via contractual penalties

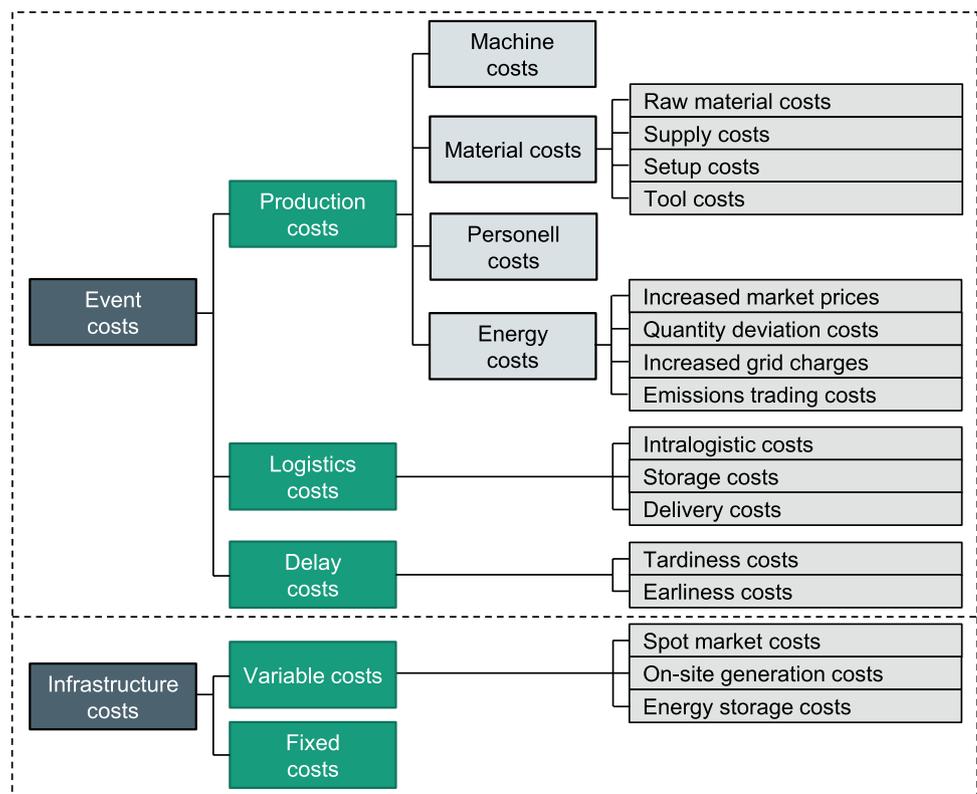
[44]. Logistics costs summarise intralogistics, delivery and storage costs. Additional storage costs are to be understood as capital commitment costs due to inventory build-up [44, 45] while delivery costs may be charged for unscheduled usage of external logistic services.

The generic term production costs include machine, material, personnel and energy costs. Maintenance, planning, and additional shift costs are considered with a common factor for personnel cost, following [44]. Machine costs are calculated from an hourly machine rate. Costs for non-utilisation, as in Ref. [44], or additional interest costs are not considered. Material costs arise from the needs for additional raw materials, operating materials, tools [44] and setup procedures. Energy costs include cost changes due to costs for increased market prices, penalties for deviations from quantity tolerances, costs due to increased grid charges in the case of violations of the annual peak load, and deviations in the required emissions trading volumes.

Figure 10 summarises the structure of the cost model.

The calculations of all cost components are based on previously determined parameters of the extents of damage and impacts or associated interim values for all single elements and all identified paths. This is made possible by the handling of single-element and path effects within a unified system. All the cost components are traceable for every standalone risk or measure, every complete path

Fig. 10 Structure of the cost model



and every step of a path by the anchoring the cost model calculations in the principle of unified profiles.

4.5.2 Risk

As described in Sect. 2.2, risk quantification is based on the following relationship:

$$\text{Risk} = \text{probability of occurrence} \cdot \text{damage} \quad (1)$$

When risks and measures in energy-flexible production systems are considered in this approach, the risks' extents of damage or the impacts of the measures are primarily modelled in the presented dimensions of energy-oriented PPC target parameters (for instance ΔLT) or a monetary dimension. Accordingly, the formula can be paraphrased for any target value or cost deviation.

4.5.3 Energy-flexibility

To evaluate single element or combination effects in the planning phase energy-oriented PPC, the remaining reactive energy-flexibility for subsequent interventions in the level of production control is relevant. The evaluation parameter "energy flexibility" is considered to indicate remaining flexibility for interventions that are not defined by the risk treatment. This can be relevant if a planning period contains events that cannot be identified during risk identification due to missing knowledge. Examples include critical products such as complex moulds in the foundry process, as well as the possibility of urgent orders from important customers.

Pertinent literature on the modelling and quantification of energy-flexibility focusses on several characterising components. The potential load change or the dimension "states" of the considered production station and EFM costs and the time characteristics are most frequently named [20, 22, 31]. In this approach, the on-site generation of electricity, electricity storage and load balancing by spot market trading are separated from measures within the production system. Accordingly, the degree of utilisation of the potentials of peripheral energy-flexibility must be separately quantified. Costs are already being considered in a cost model and therefore not included in the following proceedings.

For each of the above-mentioned characterising components of energy-flexibility, a dimensionless key figure, which may represent relative changes in positive and negative directions display constellations without any effects on energy-flexibility, must be defined. The combination of these key figures can then be obtained by multiplication because they do not have any units. This allows adjustments to the approach by adding factors for later refinements or customisation.

In the component for the dimension of time EF_t , the planning scope for shifting processes and the corresponding loads can be derived from the buffer times Δt_{buffer} . Risks negatively influence buffer times due to delays in process steps. With the increasing risk- or action-induced consumption of buffer times $\Delta t_{buffer, is}$, the remaining energy-flexibility decreases in relation to the planned state ($\Delta t_{buffer, plan}$). If a gain in buffer time is achieved by risks occurring or measures implemented, the energy-flexibility increases accordingly:

$$EF_t = \frac{\Delta t_{buffer, is}}{\Delta t_{buffer, plan}} \quad (2)$$

For the key figure component of the state dimension, EF_{states} , the process internal load shift potential left available after the effect of risks, measures or paths, expressed as (ΔP_{effect}), can be used for quantification. The energy-flexibility decreases with an increasing occupied share of load lifting and load shedding potential $\Delta P_{max, process}$:

$$EF_{states} = \frac{\Delta P_{max, process} - \overline{\Delta P_{effect}}}{\Delta P_{max, process}} \quad (3)$$

The closer the average loads of the storage facility ($\overline{P_{storage, is}}$) and on-site generation unit ($\overline{P_{onsitegen, is}}$) are to their respective nominal values ($P_{storage, rated}$, $P_{onsitegen, rated}$), the smaller is the scope remaining for intervention in production control. Consequently, the degree of utilisation of the potentials of the technical energy-flexibility (EF_{tech}) must be quantified:

$$EF_{tech} = 1 - \frac{(\overline{P_{storage, is}} + \overline{P_{onsitegen, is}})}{(P_{storage, rated} + P_{onsitegen, rated})} \quad (4)$$

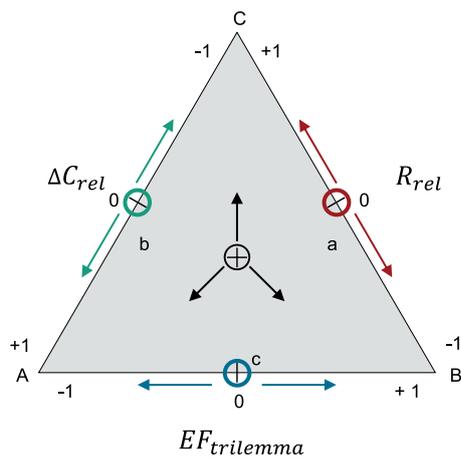
All values that are utilised in the calculations of the measure presented here for energy-flexibility have already been obtained in the previous course of the method presented.

By multiplying the components, a dimensionless measure of energy-flexibility, EF , is obtained:

$$EF = EF_t \cdot EF_{states} \cdot EF_{tech} \quad (5)$$

4.5.4 Connection of the evaluation parameters in a trilemma

The three evaluation variables are plotted in a trilemma that displays specific risk-measure situations as a field of tension in order to visualise the conflict between the energy-oriented PPC key figures costs, energy-flexibility and risk. The aim is to represent relative changes in the positive and negative directions for each variable as deviations from a zero point in the centre of a triangle side, as shown in Fig. 11:



- ΔC_{rel} Relative additional costs
- R_{rel} Relative risk
- $EF_{trilemma}$ Energy Flexibility (transformed)

Fig. 11 Trilemma

Therefore, the evaluation parameters must be transformed and brought into a dimensionless form. Additionally, the trilemma parameters must be set to zero for the original production plan. The measure of energy-flexibility is transformed as follows:

$$EF_{trilemma,i} = EF_i - 1 \tag{6}$$

To transform the cost dimension into a trilemma parameter for paths, only the changes in costs induced by the measures included for a considered path ($\Delta C_{tot,i}^M$) are related to the original absolute planned costs for the input production schedule, C_{plan} . Thus, $C_{rel,i}$ becomes negative for cost savings, positive for a measure-related increase in costs and is “0” if the cost situation remains unchanged:

$$C_{rel,i} = \frac{\Delta C_{tot,i}^M}{C_{plan}} \tag{7}$$

The exclusion of the monetary effect of risks that are included in considered paths for the calculation of the trilemma cost parameter is needed for consistency with the third trilemma parameter of risk. The risk $R_{rel,i}$ is expressed in the trilemma relative to the maximum risk value ($R_{C,max}$) present in the system from the effect of individual elements or paths. The respective calculation uses the monetary risk $R_{C,i}$:

$$R_{rel,i} = \frac{R_{C,i}}{R_{C,max}} \tag{8}$$

A negative risk indicator $R_{rel,i}$ represents a positive effect of a considered path or single element on the overall risk situation. In this case, the terms opportunity or chance, as definitional opposites of the term risk, can be used to describe the situation.

With the quantification via the trilemma parameters and the corresponding visualisation, decision-makers in production planning are given a tool to weigh up the considered production system’s risk situation and choose the planning compensation measures according to their risk preference. They can primarily weigh up risk and cost and use the evaluation of energy-flexibility as an additional criterion if two similar paths exist or if changes in customer orders in the future planning period under consideration are critical or very difficult to assess. Thus, the presented method enables structured and data-based comparisons instead of purely experience-based weighing of options. Filtering of the vast number of paths is made possible by the trilemma risk criterion, on which further analysis and in-depth comparison of data-based damage effects and probability of occurrence information by manual selection can be established. The possibility of disregarding certain situations, in which extreme amounts of potential damage are dragged down to low-risk criterion values by minimal probabilities of occurrence (or vice versa) is intercepted by the general possibility of data-based threshold monitoring for each of the dimensions of damage defined in the risk and path profiles.

5 Implementation in MATLAB®

For the application, the approach presented has been implemented in MATLAB®. The results are visualised and selectable in a MATLAB® AppDesigner graphical user interface (GUI). The created interface is divided into several tabs. Input data is read by the program from a specially created, standardised Comma-separated values (CSV) file. This enables the user-friendly collection of the required data. As the tab structure and tasks provide a good impression of the program capabilities and display options, it is listed in Table 2.

Figure 12 shows the tab structure’s graphical layout in the GUI and demonstrates the “Risk Dashboard: Paths” tab as a screenshot of the tool.

6 Application of the approach

6.1 Description of the use case

The method and its software implementation are demonstrated using the example of a foundry. The foundry industry is generally energy-intensive due to the physical

Table 2 Tabs in the created MATLAB® AppDesigner GUI

Tabs	Task, features
System	Display of description texts for single elements, directed graphs and the total number of paths
Elements	Display of single element profiles (risks and measures)
Paths	Display of path profiles
Cost model	Display of cost component and total cost variances for individual elements and paths
Element comparison	Comparison function for elements by selecting two single elements and one comparison value
Path comparison	Comparison function for paths by selecting two paths and one comparison value
Trilemma: elements	Display of the trilemma for individual elements (see Chapter 7.4)
Risk dashboard: elements	Overview of trilemma, profile, costs and description of selectable individual elements
Risk dashboard: paths	Overview of trilemma, profile, costs and description of selectable paths
Trilemma: paths	Display of the trilemma for paths
Deviant load curves	Display of path or single element influenced load curves and the planned load curve without consideration of on-site generation, use of energy storage or spot market trading
Periphery-compensated load curves	Display of path or single element influenced load curves and the planned load curve with consideration of on-site generation, use of energy storage or spot market trading
Energy: elements	Display of time series of own generation, energy storage operation and intraday spot market trading volume for individual elements
Energy: paths	Display of time series of own generation, energy storage operation and intraday spot market trading volume for paths

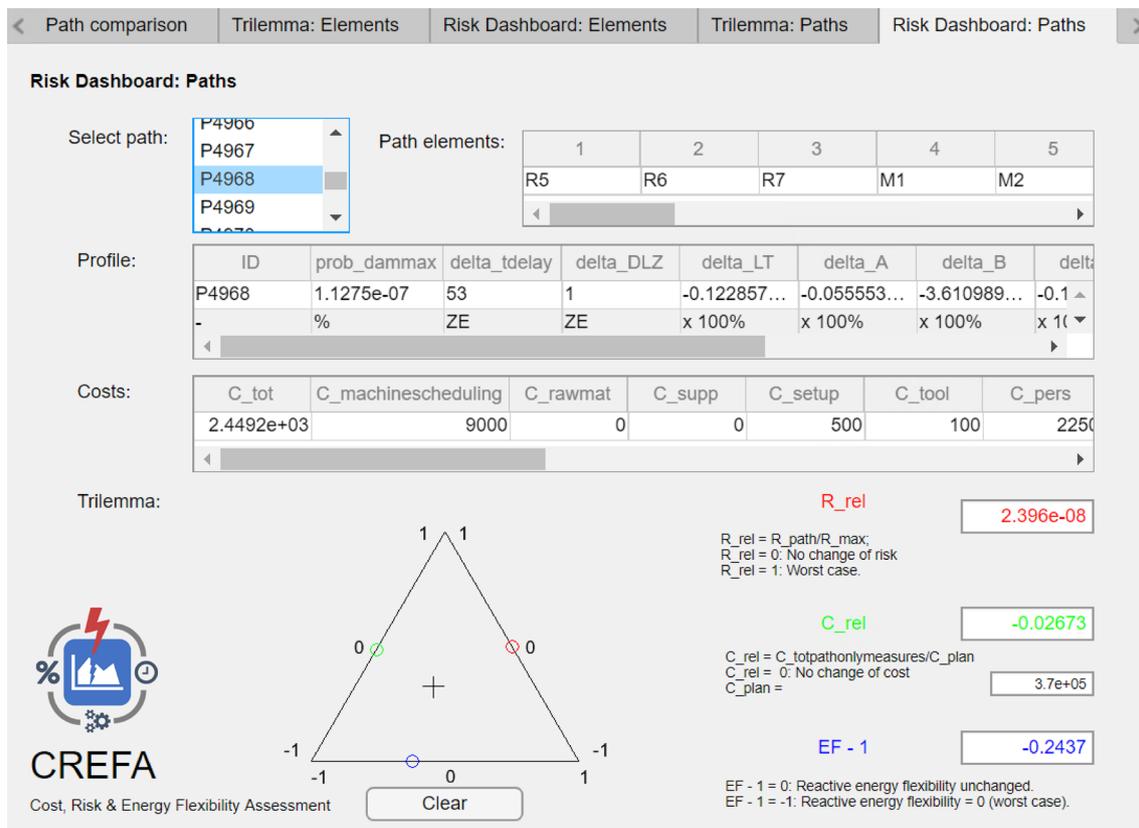
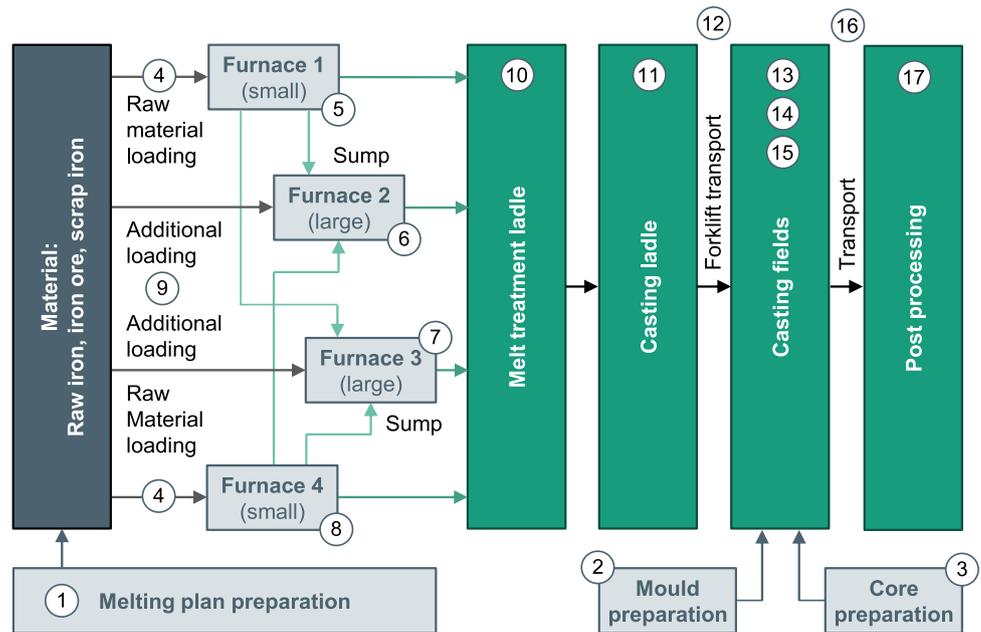
**Fig. 12** Screenshot of the implementation in MATLAB®

Fig. 13 Process steps in the foundry



conditions required for melting metals. The process being considered, depicted in Fig. 13, consists of the process steps of melting plan preparation (1), mould preparation (2), core preparation (3), raw material loading (4), four separately considered process steps for melting the raw material in four furnaces (5–8), additional loading (9), the addition of additives in the treatment ladle (10), the transfer of the melt into the ladle (11), forklift transport of the casting ladle to the casting fields (12), casting (13), cooling (14), demoulding (15), transporting the castings to finishing (16) and post-processing (17). The small furnaces 1 and 4 are used for direct feeding of the melt treatment ladle (10) or for pre-melting sump material for furnaces 2 (6) and 3 (7). The sump can be supplemented by additional recharging. The production plan presented is transferred to a table of process step times and loads to generate a resulting planned load schedule. The duration of the associated planning period is 65 TUs, which equals 16.25 h.

For the casting process, ten identified risks were prioritised in advance and described with the necessary information for automated utilisation by the software, e.g., the risk of a defective mould core or casting damage while demoulding. The risks are always listed in relation to the process step for classification in the production plan. In addition to the risks, the system considers one preventive RTM per risk and three additional EFMs for the use case. Measures include adjusting furnace operation parameters or changing the casting order, for example. Further input data sets derived from the use case are the overall

electricity procurement schedule of the considered company, calculatory cost factors, basic information and the SSIM.

6.2 Application and results

A total of 7544 possible paths for the interactions and dependencies of the 23 individual elements specified in the SSIM have been identified by the method. As an example, the Risk Dashboard for path P4968 is presented in Fig. 12.

The randomly selected exemplary path P4968 consists of the elements R5, R6, R7, M1 and M2. Thus, a planning period is modelled in which the occurrence of R5, R6 and R7 is assumed before M1 and M2 are applied. The three risks considered are the possibilities of crane failure at the casting field, failure of the forklift for transport to the casting fields and the failure of furnace number 4. To counteract them measures M1 and M2 are deployed. The composition of the path results from the specified element interactions and dependencies in the SSIM.

Due to the number of coinciding elements (five), the path’s extent of damage is greater than for an individual risk, but the probability of occurrence is very low. To directly compare the different measure and consequence risk constellations, starting from certain risks, the corresponding paths can be selected under the tab “Path comparison” and then be matched in pairs regarding the characteristics of costs and deviations from target values.

Non-relevant constellations can be filtered out by applying a certain minimum value of risk to reduce the large number of paths.

To decide the specific measures to be taken, two almost similar paths that are only distinguished by these measures must be considered. Between the paths, the preferred relationship between risk reduction and costs can be selected. In addition, flexibility can be considered to ensure that a chosen path offers sufficient flexibility for possible interventions that are not considered in risk management in production planning.

For example, path P4969 can be compared to the above-mentioned path P4968, as it is identical to P4968 but includes RTM M3 as an additional element. Measure M3 (change of process parameters in furnace 3) lowers the average power consumption of melting in furnace 3 by 400 kW. The application of M3 on P4968 leads to a decrease of the energy-flexibility trilemma parameter from 0.563 to 0.7382. Path-induced additional overall costs C_{tot} increase from €2449 to €2686 in absolute numbers, including risk and measure related cost deviations. The relative cost trilemma parameter, which only considers measure-induced cost deviations, ranges from -0.02673 to -0.0111 . Risk decreases from $2.396E-08$ to $1.737E-08$. The overall results indicate that the application of RTM M3 may reduce the relative risk by roughly -27.5% at the absolute price of €237. This exemplary constellation can now be interpreted and compared to all the alternative paths and the respective calculation results by users according to their respective risk adversity.

The results show how the structuring of risk and measure interdependencies and interactions, the construction of a general format for the quantification of risk-induced damage and measure impact, the discretisation of risk and measure effects in the dimensions of time and energy and the presented approach to the triple evaluation work together to enable risk-aware decision support in the planning of energy-flexible production systems. The presented software implementation carries out these steps automatically and visualises the results fully and directly. Only the required input data and information must be provided in the given structure on the user side. Similar paths are listed subsequently and are visually displayed as node-arc-combinations to ensure easy comparability for the user. However, considering the targeted search for specific elements or their combinations, the user interface could be improved in the coming versions.

7 Conclusion and outlook

The method for risk handling developed supports the work of operational production planning and control through the structured assessment of risks and measures. In doing so,

complex interactions between effects and conditional probabilities of occurrence are considered, which could not be dealt with intuitively. The feasibility and applicability were demonstrated by developing a tool in MATLAB® and using it in a real industrial application. The method increases the manageability of risks in energy-flexible production systems. If companies are enabled to plan and control in an energy-oriented manner, this means adapting to volatile renewable energy systems, which can then be better integrated into the energy system. Thus, the approach supports both the profitability of companies and the achievement of the energy transition goals.

Three areas for further developments and additions have been identified to achieve even better results. These are the identification and evaluation of risks, the creation and evaluation of the paths as well as the selection and integration of paths into the production plan.

In the approach presented, the identification and classification of risks and measures is essentially based on creative techniques and the use of expert knowledge. The information provided by the experts could be abstracted and evaluated using approaches such as fuzzy logic to compensate for misjudgements. The integration of historical plant data and production data facilitates data mining approaches that can be utilised to detect possible events and identify the values for the risk and measurement inventory.

Within the development and evaluation of the paths, the calculation of probabilities of occurrence for paths can be enhanced by applying Copula theory. Copulas allow the calculation of combined distribution functions and thereby generate greater depth and variety of probability information. More detailed modelling of the possibilities of on-site electricity generation, as well as the integration of framework conditions and strategies for strategic energy storage use, may raise the additional economic potential of energy-oriented PPC. A more in-depth consideration could be given to risks to peripheral energy-flexibility, for example, risks relating to independent generation and electricity storage. In the presentation within the evaluation framework, the trilemma size R_{rel} , related to the present maximum value is only meaningful with significance to the relative negative impacts. Large maxima of the risk value distort the informative value of the figure. A more in-depth examination and modelling of the trilemma variables can increase the benefit of this form of presentation as a decision support tool in energy-oriented production planning.

Potential dependencies between the planning period's length and the number of risks and resulting effects on the calculation period should be examined in detail in further studies. Also, the programme's stability might be affected by, e.g., a significant increase in the number of risks.

To select paths and their integration into production plans, it is necessary to develop a structured approach that

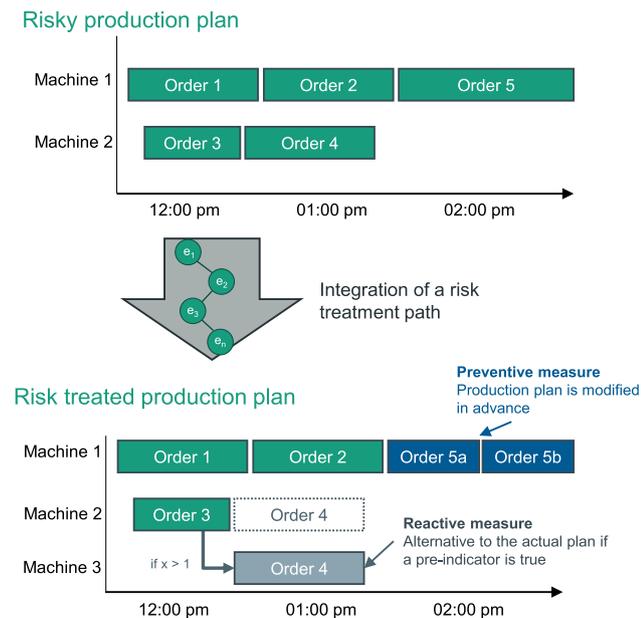


Fig. 14 Integration of preventive and reactive measures

supports the decision-makers. To do this, the company's respective risk preferences must be identified, and any differences specific to the order or production segment must also be considered. Furthermore, an approach needs to be developed with which the appropriate path can then be selected based on the key figure. This path is then to be integrated into the original production plan by an appropriate approach. Figure 14 shows an example of how a distinction must be made between preventive and reactive measures on the path. Preventive measures modify the production plan, while reactive measures are alternatives to an actual plan that are selected when specific limit values, are exceeded or not reached. In the example, an order for machine 1 is divided as a preventive measure to limit the effects of damage of a certain risk. As a reactive measure, an order is moved from machine 2 to machine 3 if a critical value (shown here in a simplified form as " $x > 1$ ") is violated.

The approaches to be developed to integrate the measures into the production plans need to be suitable for both the process and manufacturing industries. Therefore, suitable solutions must be developed to assign measures to continuous processes and individual orders.

Acknowledgements The authors gratefully acknowledge the financial support of the Kopernikus-Project "SynErgie" from the Federal Ministry of Education and Research (BMBF), and the supervision of the project by the Projektträger Jülich (PTJ) project management organisation.

Funding Open Access funding enabled and organized by Projekt DEAL.

Open Access This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

References

- Schuh G, Stich V (2012) Produktionsplanung und -steuerung 1. Grundlagen der PPS, 4. Aufl. Springer, Berlin. ISBN 978-3-642-25422-2
- Wiendahl H-P (2010) Betriebsorganisation für Ingenieure, 7., aktualisierte Aufl. Hanser, München, ISBN 978-3-446-41878-3
- Lödging H, Mundt C, Winter M, Heuer T, Hübner M, Seitz M, Schmidhuber M, Maibaum J, Bank L, Roth S et al (2019) PPS-Report 2019 – Studienergebnisse. TEWISS-Technik und Wissen GmbH. ISBN 978-3-95900-402-2
- Verein Deutscher Ingenieure VDI (2019) Energieflexible Fabrik. Grundlagen. Beuth Verlag, Berlin
- Konstantin P (2017) Praxisbuch Energiewirtschaft. Energieumwandlung, -transport und -beschaffung, Übertragungsnetzausbau und Kernenergieausstieg, 4., aktualisierte Auflage. Springer Vieweg, Berlin. ISBN 9783662498224
- Keller F, Schultz C, Braunreuther S, Reinhart G (2016) Enabling energy-flexibility of manufacturing systems through new approaches within production planning and control. Proc CIRP 57:752–757. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.130>
- Bertsch J, Schweter H, Buhl HU, Fröding G, Körner M-F, Michaelis A, Rägo V, Sachs T, Schöpf M, Schott P (2019) Ausgangsbedingungen für die Vermarktung von Nachfrageflexibilität: Status-Quo-Analyse und Metastudie. 2 Fassung
- Scharmer V, Bröskamp S, Unterberger E, Zäh M (2019) Energieflexibilität in der Produktion: Betrachtung von Unternehmen mit energieintensiven Prozessen. wt Werkstattstechnik online, vol 109
- Mitra S, Grossmann IE, Pinto JM, Arora N (2012) Optimal production planning under time-sensitive electricity prices for continuous power-intensive processes. Comput Chem Eng 38:171–184. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2011.09.019>
- Moon J-Y, Park J (2014) Smart production scheduling with time-dependent and machine-dependent electricity cost by considering distributed energy resources and energy storage. Int J Prod Res 52:3922–3939. <https://doi.org/10.1080/00207543.2013.860251>
- Rager M, Gahm C, Denz F (2015) Energy-oriented scheduling based on evolutionary algorithms. Comput Oper Res 54:218–231. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2014.05.002>
- Agha MH (2009) Integrated management of energy and production: scheduling of batch process and combined heat & power (CHP) plant. Dissertation, Institut National Polytechnique de Toulouse
- Schulz S, Neufeld JS, Buscher U (2019) A multi-objective iterated local search algorithm for comprehensive energy-aware hybrid flow shop scheduling. J Clean Prod 224:421–434. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.155>

14. Schultz C, Sellmaier P, Reinhart G (2015) An approach for energy-oriented production control using energy flexibility. *Proc CIRP* 29:197–202. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.038>
15. Roesch M, Lukas M, Schultz C, Braunreuther S, Reinhart G (2019) An approach towards a cost-based production control for energy flexibility. *Proc CIRP* 79:227–232
16. DIN ISO 31000:2018 Risikomanagement - Leitlinien (Risk management - Guidelines). Beuth Verlag GmbH, Berlin
17. Chauhan AS, Yadav OP, Soni G, Jain R (2017) A holistic approach to manage risks in NPD process. *Annu Reliab Maintainab Symp RAMS* 2017:1–5. <https://doi.org/10.1109/RAM.2017.7889796>
18. Niesen T, Houy C, Fetke P, Loos P (2016) Towards an integrative big data analysis framework for data-driven risk management in industry 4.0. In: 49th Hawaii international conference on system sciences, pp 5065–5074. <https://doi.org/10.1109/HICSS.2016.627>
19. Geiger F, Reinhart G (2016) Knowledge-based machine scheduling under consideration of uncertainties in master data. *Prod Eng* 10:197–207. <https://doi.org/10.1007/s11740-015-0652-5>
20. Simon P, Roltsch F, Glasschröder J, Reinhart G (2017) Approach for a potential analysis of energy flexible production systems. *Proc CIRP* 63:580–585. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.153>
21. Klöber-Koch J, Braunreuther S, Reinhart G (2017) Predictive production planning considering the operative risk in a manufacturing system. *Proc CIRP* 63(2017):360–365
22. Schott P, Sedlmeir J, Strobel N, Weber T, Fridgen G, Abele E (1893) A generic data model for describing flexibility in power markets. *Energies* 2019:12. <https://doi.org/10.3390/en12101893>
23. Klöber-Koch J, Braunreuther S, Reinhart G (2018) Approach for risk identification and assessment in a manufacturing system. *Proc CIRP* 72:683–688
24. Pfohl H-C, Gallus P, Thomas D (2011) Interpretive structural modeling of supply chain risks. *Int J Phys Distrib Logist Manag* 41:839–859
25. Shakya R, Chauhan P (2019) Modelling of risk analysis in production system. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng* 691:12087. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/691/1/012087>
26. Pereira JC, Fragoso MD, Todorov MG (2016) risk assessment using bayesian belief networks and analytic hierarchy process applicable to jet engine high pressure turbine assembly. *IFAC Pap Online* 49:133–138. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.563>
27. Daultani Y, Goswami M, Vaidya OS, Kumar S (2019) Inclusive risk modeling for manufacturing firms: a Bayesian network approach. *J Intell Manuf* 30:2789–2803. <https://doi.org/10.1007/s10845-017-1374-7>
28. Wu W-S, Yang C-F, Chang J-C, Château P-A, Chang Y-C (2015) Risk assessment by integrating interpretive structural modeling and Bayesian network, case of offshore pipeline project. *Reliab Eng Syst Saf* 142:515–524. <https://doi.org/10.1016/j.res.2015.06.013>
29. Schultz CM (2018) System zur energieorientierten Produktionssteuerung in der auftragsbezogenen Fertigung. Dissertation, Technical University of Munich, Munich
30. Roth S, Weber M, Hohmann A, Reinhart G (2020) Risk assessment and treatment planning for energy-flexible production systems using an additional cost model. *IEEE Int Conf Ind Eng Eng Manag IEEM*. <https://doi.org/10.1109/IEEM45057.2020.9309944>
31. Graßl M, Reinhart G (2014) Evaluating measures for adapting the energy demand of a production system to volatile energy prices. *Proc CIRP* 15:129–134
32. Sinsel A (2020) Grundlagen der Produktionsoptimierung. In: Sinsel A (ed) *Das Internet der Dinge in der Produktion: Smart Manufacturing für Anwender und Lösungsanbieter*. Springer, Berlin, pp 39–77. ISBN 978-3-662-59760-6
33. Lödding H (2008) *Verfahren der Fertigungssteuerung*. Springer, Berlin
34. Cottin C, Döhler S (2013) *Risikoanalyse. Modellierung, Beurteilung und Management von Risiken mit Praxisbeispielen*, 2., überarb. u. erw. Aufl. Springer, Wiesbaden. ISBN 9783658008291
35. Watson RH (1978) Interpretive structural modeling—a useful tool for technology assessment? *Technol Forecast Soc Chang* 11:165–185. [https://doi.org/10.1016/0040-1625\(78\)90028-8](https://doi.org/10.1016/0040-1625(78)90028-8)
36. Shafer W (2019) *Transitivity. The new Palgrave dictionary of economics*, Living edition. Palgrave Macmillan, London, pp 1–3. ISBN 978-1-349-95121-5
37. Yang F, Duan P, Shah SL, Chen T (2014) Capturing connectivity and causality in complex industrial processes. Springer International Publishing, Cham. ISBN 978-3-319-05379-0
38. Qazi A, Quigley J, Dickson A, Ekici ŞÖ (2017) Exploring dependency based probabilistic supply chain risk measures for prioritising interdependent risks and strategies. *Eur J Oper Res* 259:189–204. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.10.023>
39. Jensen FV, Jordan M, Kleinberg J, Nielsen TD, Schölkopf B (2007) *Bayesian networks and decision graphs*, 2nd edition. Springer, New York. ISBN 9780387682815
40. Pearl J (1988) *Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems*. Elsevier. ISBN 9780080514895
41. Garvey MD, Carnovale S, Yeniurt S (2015) An analytical framework for supply network risk propagation: a Bayesian network approach. *Eur J Oper Res* 243:618–627. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.10.034>
42. Henrion M (1988) Practical issues in constructing a Bayes belief network. *Int J Approximate Reasoning* 2:337. [https://doi.org/10.1016/0888-613x\(88\)90146-6](https://doi.org/10.1016/0888-613x(88)90146-6)
43. Pielmeier JN (2019) *System zur ereignisorientierten Produktionssteuerung*. Dissertation, Technical University of Munich, Munich
44. Roesch M, Berger C, Braunreuther S, Reinhart G (2018) Cost-model for energy-oriented production control. In: *IEEE international conference on industrial engineering and engineering management (IEEM)*, pp 158–162. <https://doi.org/10.1109/IEEM.2018.8607305>
45. Johannes C, Wichmann MG, Spengler TS (2019) Energy-oriented production planning with time-dependent energy prices. *Proc CIRP* 80:245–250. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.01.010>

Publisher's Note Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

Article

Risk Treatment for Energy-Oriented Production Plans through the Selection, Classification, and Integration of Suitable Measures

Stefan Roth * , Mirjam Huber, Johannes Schilp and Gunther Reinhart

Fraunhofer Institute for Casting, Composite and Processing Technology IGCV, Am Technologiezentrum 10, 86159 Augsburg, Germany; mirjam.huber@igcv.fraunhofer.de (M.H.); johannes.schilp@igcv.fraunhofer.de (J.S.); gunther.reinhart@igcv.fraunhofer.de (G.R.)

* Correspondence: stefan.roth@igcv.fraunhofer.de

Abstract: With rising electricity prices, industries are trying to exploit opportunities to reduce electricity costs. Adapting to fluctuating energy prices offers the possibility to save electricity costs without reducing the performance of the production system. Production planning and control play key roles in the implementation of the adjustments. By taking into account the price forecasts for the electricity markets in addition to machine utilization, work in process, and throughput time, an energy-oriented production plan is set up. The electrical energy is procured based on this plan and the associated load profile. Deviations from the forecast and the purchased amount of electricity lead to high penalties, as they can destabilize the energy system. For manufacturing companies, this means that machine failures and other unexpected events must be dealt with in a structured manner to avoid these penalty costs. This paper presents an approach to selecting, classifying, and integrating suitable measures from existing risk treatment paths into the production schedule. The selection of measures is based on a hybrid multi-criteria decision-making method in which the three relevant criteria, namely, cost, energy flexibility, and risk reduction, are weighted by applying both an analytic hierarchy process and entropy, and they are then prioritized according to multi-attribute utility theory. In the following, the subdivision into preventive and reactive measures is made in order to choose between the modification of the original plan or the creation of backup plans. With the help of mathematical optimization, the measures are integrated into the production schedule by minimizing the cost of balancing energy. The approach was implemented in MATLAB® and validated using a case study in the foundry industry.

Keywords: production planning and control; scheduling; energy flexibility; risk management; fault management; multiple-criteria decision-making



Citation: Roth, S.; Huber, M.; Schilp, J.; Reinhart, G. Risk Treatment for Energy-Oriented Production Plans through the Selection, Classification, and Integration of Suitable Measures. *Appl. Sci.* **2022**, *12*, 6410. <https://doi.org/10.3390/app12136410>

Academic Editor: Panagiotis Tsarouhas

Received: 19 April 2022

Accepted: 22 June 2022

Published: 23 June 2022

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2022 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Industries are facing the challenge of rising costs for electrical energy. The average electricity price for new contracts for the industry in Germany increased from €0.1207 per kWh in 2010 to €0.2138 per kWh in 2021. During this period, bulk buyers with an annual consumption of 70 million kWh or more had an increase from €0.0863 to €0.1149 per kWh with occasional drops [1]. Both small and medium-sized as well as energy-intensive industrial companies are therefore encouraged to take advantage of opportunities to reduce their electricity costs in order to maintain their competitiveness in the long term.

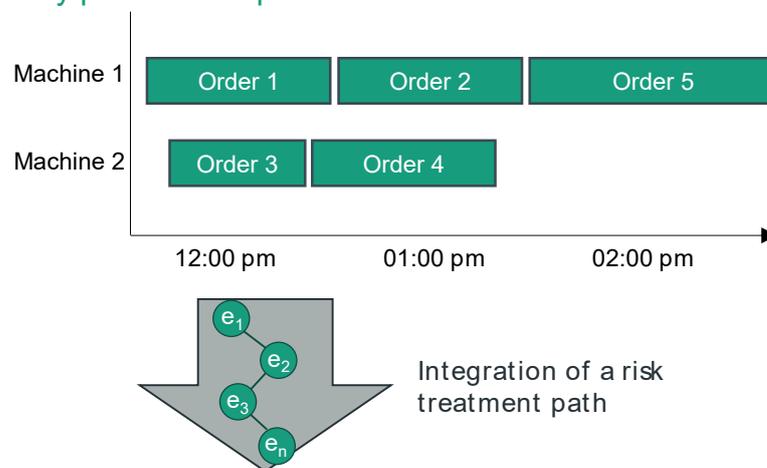
A promising approach to reduce these costs is adjusting the electricity demand to the variable prices on the energy markets. In the day-ahead market, the number of hours with negative electricity prices rose from 134 in 2018 and 211 in 2019 to 298 h in 2020. The mean value of the negative prices ranged in these years between −€13.70 and −€17.30 per MWh. Averaged over the respective year, the maximum daily price spread was around

€30 per MWh [2,3]. This price volatility in the electricity markets is significant for potential cost reduction.

The prerequisite to take advantage of these favorable prices and to comply with the restrictions on annual peak load and deviations is so-called energy-oriented production planning and control (PPC), which considers variable price forecasts for the electricity markets in addition to machine utilization, work in process, throughput time, and other criteria in a production system [4]. PPC is also responsible for dealing with unforeseen events such as machine failures and the corresponding adjustment of the order sequence in order to achieve the specified production targets as cost-effectively as possible [5]. With regard to electricity consumption, it is particularly important to avoid exceeding the annual peak load and deviations from the amount of electricity procured. These lead to higher grid charges or penalty costs for the imbalance caused between the available and used electrical energy in the electricity system. In order to avoid these costs, approaches within the energy-oriented PPC are required to evaluate potential risks within a production plan and to integrate suitable measures.

Roth et al. [6] introduce an approach for developing and evaluating risk treatment paths in energy-flexible production systems based on interpretive structural modeling and the calculation of conditional probabilities using Bayesian networks. Figure 1 depicts the idea of the approach in which a risk treatment path and the measures contained therein are integrated into the production plan in order to obtain a risk-treated production plan. The advantage of these paths compared to a situational reaction is that all the effects and possible interactions can be considered in advance. The approach creates a multitude of paths, as all identified risks and measures are linked based on their interactions and conditional probabilities.

Risky production plan



Risk-treated production plan

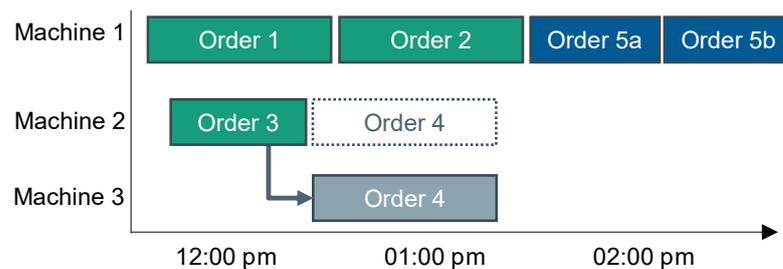


Figure 1. Integration of a risk treatment path into a production plan [6].

The approach thus leaves a need for further development with regard to the selection of a suitable path and the classification and integration of the measures it contains. In the literature, a large number of methods exist for the selection of alternatives, but there is no adaption to energy-oriented PPC. Furthermore, the state of the art offers no subdivision of energy flexibility measures into preventive and reactive, which is necessary for forward looking direct adjustments to the plan and alternative strategies if faults occur.

It is assumed that this should also follow a specific and structured approach in order to reduce the effort required for risk treatment and thus increase the acceptance of its implementation in companies. This article presents an approach that responds to these requirements. It starts with the paths shown in Figure 1 and presents how a preferred path can be selected and how the measures contained can be integrated into the production plan.

In the following, Section 2 first presents the state of the art in the relevant areas and the resulting need for action. Section 3 then introduces the scientific concept of the approach, which is described in detail in Section 4. The application based on a use case in a foundry is depicted and discussed in Section 5. The article closes with a conclusion and outlook in Section 6. The key notations are listed in Table 1.

Table 1. Notations.

Parameter	Description
A	Weighting decision matrix
a	Elements of the weighting decision matrix
ΔC_{tot}^M	Change in measure-induced total costs
ΔC_{tot}^R	Change in risk-induced total costs
ΔC_{tot}	Change in total costs
$const_t$	Energy consumption in time unit t
D	Decision matrix
$duration_{ks}$	Duration of job k on station s
e	Entropy
EF	Energy flexibility
EF_{states}	Energy flexibility states
EF_t	Energy flexibility time
EF_{tech}	Energy flexibility technologies (e.g., storage facilities)
end_{ks}	Due date of job k on station s
i	Alternative
j	Criteria
k	Job
P	Probability of occurrence of risks and measures
P_{risk}	Probability of occurrence of risks
$peak_{max}$	Maximum peak load
Δpow_t	Deviation of the actual energy consumption from the forecasted load profile
$Power_{ks}$	Power consumption of job k on station s
$Power_t^{planned}$	Planned power consumption in time period t
QDC	Quantity deviation cost
r_{ij}	Rating for alternative i with criterion j
s	Station
$start_{ks}$	Start time of job k on station s
t	Time unit
u_{ij}	Marginal utility score for alternative i with criterion j
U_i	Final utility score for alternative i
\vec{v}	Eigenvector
w	Weighting
w_{AHP}	Subjective criteria weighting by analytic hierarchy process (AHP)
$w_{Entr,j}$	Objective criteria weighting by entropy
w_j^{final}	Final weighting for a criterion j
λ_{max}	Largest eigenvalue

2. State of the Art

This section first describes the state of the art in the field of risk management and energy-oriented PPC. Since various criteria have to be taken into account in risk management, common methods for solving complex decision problems are presented. In the following, methods for the categorization of measures are introduced. The need for action on which this contribution is based is then derived from these key areas.

2.1. Risk Management and Energy-Oriented PPC

Since failures, in general, can have far-reaching negative effects on the performance of a production system as well as on the manufacturing costs of the products, many articles offer a structure for the causes and effects of malfunctions as well as approaches for situational fault management. According to Schwartz and Voß [7], faults are events that have an effect on a process with a deviation from what was intended to occur. Greve [8] distinguishes between those faults which originate from the process and those that influence the process from outside. The causes are often used to further classify faults. A distinction is made between equipment-related, personnel-related, material-related, information-related, and order-related causes of failure by various authors [9–13]. Every cause of failure can be linked to its effects on a production system. An allocation of causes and effects, which also takes into account deviations in the electrical load profile, was worked out by Schultz [13]. In his contribution, a system is presented with which deviations in energy-flexible production systems can be counteracted with situational measures. Rösch et al. [14] introduce an approach for cost-based online scheduling to enable reactions to short-term changes and thus makes a contribution to fault management in energy-flexible production systems.

Risk management is characterized in particular by the fact that it also takes into account the probability of occurrence of the event when dealing with faults [15]. Many risk management approaches in the field of production systems are mostly based on the risk management process described in DIN ISO 31,000 [15] with risk identification, risk analysis, risk assessment, and risk treatment, whereby individual process steps are partially combined or sub-processes are supplemented. Various frameworks and approaches were developed specifically for the manufacturing sector. For example, the framework for risk management developed by Oduoza [16] enables key risk indicators in the manufacturing sector to be searched for and identified. Specific approaches can also be found in the area of PPC, such as Klöber-Koch et al. [17], who add production risks to a classic PPC system in order to make predictions about impending risk situations and to take these into account in the planning process.

If the energy consumption and energy costs in the production environment are to be considered in particular, specific work can also be found for this. Abele et al. [18] simulate disruptions in order to investigate their effects on the energy flexibility and costs of an energy-optimal production plan. The energy-optimized plan serves as an input variable for the subsequent simulation of faults. The changes in the production plan caused by disruptions lead to changed load profiles and thus also to changed electricity costs. The influence of disruptions is ultimately examined on the basis of the change in electricity costs and serves as a basis for decision-making for future investments in energy-oriented production.

Schultz et al. [19] integrate energy as a limited resource within the framework of energy-oriented production control. Exceeding the available energy resources is possible, but it is associated with disproportionately high costs. Taking into account the predominant goal in production control of adhering to delivery deadlines, the authors consider the fluctuations in energy consumption associated with the production process. The aim is to minimize the deviations from the planned load profile.

Golpîra [20] introduces smart energy-aware manufacturing plant scheduling. By proposing a new multi-objective robust optimization for a factory microgrid, the approach can be considered risk-based, as it considers the conditional value-at-risk. Coca et al. [21] illustrate the simultaneous evaluation of sustainability dimensions, containing environmen-

tal and occupational risks with an industrial case from the metal-mechanic sector. Energy flexibility in production systems is specifically considered in the work of Simon et al. [22]. The authors discuss the relevance of risk evaluation with regard to energy flexibility measures and present an approach to assess energy flexibility in production systems in terms of their risk potential on production goals, such as quality, costs, and throughput times.

2.2. Solving Complex Decision Problems

One difficulty in risk management is the different, sometimes conflicting, target values that need to be taken into account when making decisions. In the context of energy-oriented production planning, one example is that the capacity of stations should be utilized to fulfill the delivery time and that machine costs are reduced. On the other hand, the station utilization should be reduced in time windows with high electricity prices and be shifted to times with lower or negative prices.

In the literature, there are different approaches for multi-criteria decision-making (MCDM). A large number of articles in this field distinguishes between work on the development of new MCDM methods and detailed descriptions of their functioning (including Saaty [23], Ishizaka and Nemery [24], and Alinezhad and Khalili [25]), and comparative work that analyzes known MCDM methods (including Vujicic [26], Wang et al. [27], and Zanakis et al. [28]). Zavadskas et al. [29] give an initial overview of the relevant literature within the categories mentioned.

Zavadskas et al. [29] emphasize the increasing importance of hybrid MCDM methods for solving complex decision problems. An MCDM problem is generally divided into the steps of weighting the criteria and prioritizing the alternatives. Some MCDM methods are suitable for both weighting and subsequent prioritization, while other MCDM methods require a weighting of the criteria and do not offer a methodical approach for this.

For the selection of environmentally friendly technologies, Doczy and Razig [30] combine the analytic hierarchy process (AHP) and multi-attribute utility (MAUT) to give decision-makers in construction projects a method for a comprehensive assessment of sustainability without neglecting the conventional goals of construction planning. The evaluation is based on four criteria tailored to the construction sector. Şahin [31] conducts a comparative study of an MCDM problem in the context of sustainable energy generation in Turkey. The author compares the results of 42 decision problems resulting from a combination of different MCDM and weighting methods. The individual results are then summarized in an overall rating. Şahin concludes that a combination of several MCDM methods can compensate for the disadvantages of individual methods and thus enable a more accurate selection of the best alternative. Feizi et al. [32] combine a weighting based on AHP and Shannon entropy with a technique for order of preference by similarity to ideal solution (TOPSIS) to find an optimal mining location. The enormous number of 260,400 alternatives should be emphasized here. Ren et al. [33] compare the results of three different hybrid MCDM methods in the context of the planning of sewage treatment plants in consideration of the sustainability aspects. It is found that the technology selection is method-dependent. Consequently, they recommend not basing a decision on a single MCDM method but comparing the results of different methods. In addition, the authors consider both hard, easily quantifiable, and soft, only qualitative, decision criteria.

Muqimuddin and Singgih [34], among others, deal with the risks resulting from disruptions in the production process. The authors carry out a failure mode and effects analysis (FMEA) with three different risk priority numbers, which are weighted using an AHP. Identified faults are then prioritized with the help of TOPSIS. By combining the methods, risks are prioritized depending on the subjective assessments of the decision-maker. Turskis et al. [35] also place their method for risk assessment in the context of disruptions that endanger the information technology (IT) security of critical infrastructure. This is a holistic risk management method, which includes both risk identification and risk assessment. Wang et al. [36] consider service risks in hospitals with the aim of increasing service quality. Since service quality is primarily measured using non-quantifiable parameters, the

combination of FMEA and fuzzy MCDM developed by the authors is particularly suitable in this context.

2.3. Categorization of Measures

Risk treatment requires suitable measures to compensate for the effects of risks. Since production systems usually have very specific characteristics, various approaches to the generalization and categorization of measures can be found in the literature. Pielmeier [12] assigns measures that have a direct influence on production control to the levels of in-house production planning and control of the Aachen PPC model, which is described in Schuh and Stich [5]. The author emphasizes that event-specific control strategies can be selected through the classification. Furthermore, the classified measures are linked with target values using a cause–effect matrix. VDI 5207 Part 1 [37] assigns previously introduced energy flexibility measures to the level model of production. The energy flexibility measures cover a broad time horizon from a few seconds to several hours. The classification enables a targeted consideration of individual measures, depending on the current state of knowledge, and thus an efficient implementation of the measures.

Verhaelen et al. [38] consider reactive fault management in the context of global production processes. The methodology developed by the authors enables a flexible and quick response in the event of a malfunction. Faults are classified into a three-level categorization system based on their causes and linked to appropriate measures. Furthermore, a protocol for the description of the fault is developed that facilitates the prioritization of faults and the associated initiation of measures. Schwartz and Voß [7], on the other hand, clearly differentiate in their work between prevention strategies and reaction strategies for fault management in production. The use of the two strategies is tested using a simulation model, and the effects of the measures are assessed using efficiency and instability measures. The methodology is assigned to machine utilization planning. Hernández-Chover et al. [39] do not consider the planning of preventive and reactive measures directly, but they also weigh up between predictive maintenance and repairs that become necessary due to malfunctions. In doing so, they consider the critical infrastructure in an empirical case study and identify the proposed method as the optimal relationship between forward-looking investments and subsequent repairs.

2.4. Need for Research

The investigation of the relevant scientific subject areas led to the following research gaps, on the basis of which the need for action for the creation of the approach is derived:

1. Energy-oriented PPC mostly neglects operational fault and risk management or is based on complex algorithms with little practical suitability. In order to implement the selected measures, a sensible method of integrating measures is required.
2. A large number of methods exists for the individual weighting of alternatives, but there is no adaptation of MCDM to energy-oriented PPC. Furthermore, no approach offers the consideration of risk-specific criteria in energy-flexible production systems.
3. In the literature, there is either a subdivision into preventive and reactive measures or an assignment of measures to the Aachen PPC model. The process views of the Aachen PPC model are not divided into preventive and reactive sub-steps, which would enable both forward-looking direct adjustments to the plan and alternative strategies if faults occur.

In summary, an approach must be developed that selects relevant risks and measures to be considered in a structured manner. In addition, it should enable the subdivision into the preventive and reactive treatment of risks and finally contain the planning of the measures on the basis of the target values of the energy-oriented PPC.

3. Scientific Concept

The presented approach builds on the development and evaluation of risk treatment paths following Roth et al. [6]. It is based on the determination of interactions through

interpretive structural modeling and the calculation of conditional probabilities using Bayesian networks. The result is a multitude of risk treatment paths that contain risks and measures that can occur in a production system under consideration.

The generation of the risk-treatment paths in Roth et al. [6] is subject to several assumptions, the most important of which are:

1. The regarded area of application is limited to the use of electrical energy in production systems,
2. Processes are formalized in discrete production timetables,
3. Experts are available to supply the necessary information to generate the Bayesian networks.

Any further limitations named in Roth et al. [6] equally apply to the approach in this paper. The following assumptions apply specifically to the approach presented in this paper:

1. A discretized, energy-optimal production schedule is available,
2. For the risk-treated energy-oriented PPC, the planned energy schedules including the maximum allowances for peak loads are available,
3. A detailed risk inventory including measures is available, wherein process-specific parameters in the dimensions of time and energy consumption are known for every risk and every measure.

Figure 2 depicts a graphical overview of the approach proposed in this paper. The boxed numbers in Figure 2 additionally show in which section one can find details on the respective process step. The main process steps of the approach are:

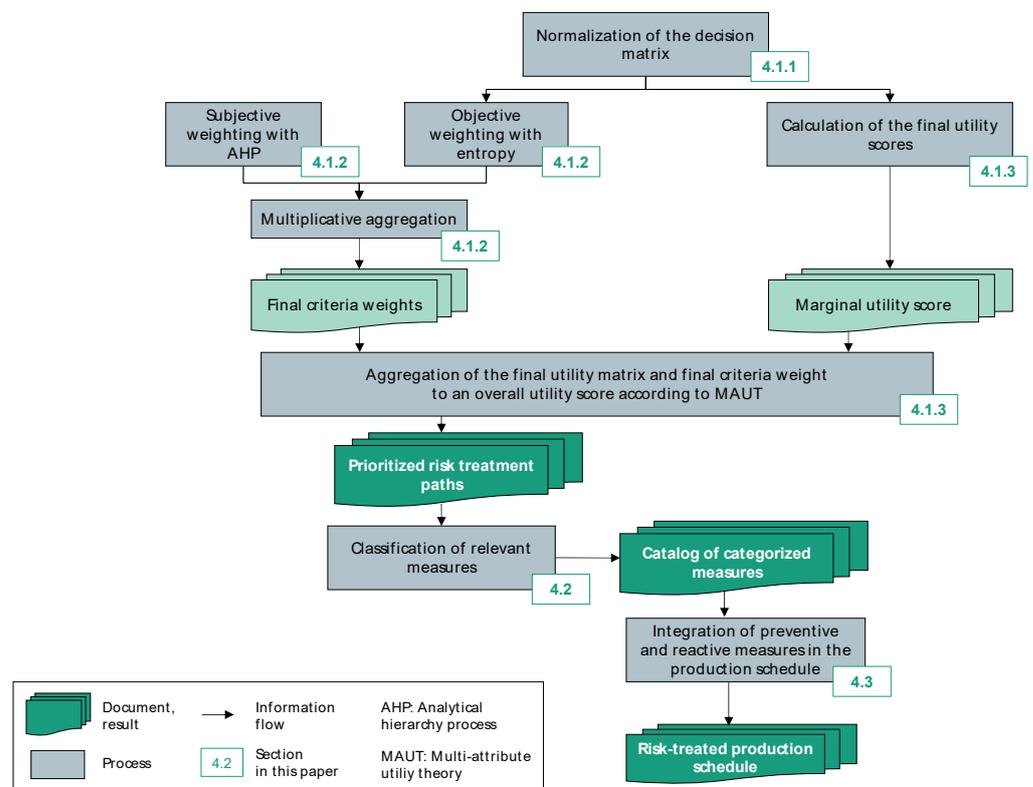


Figure 2. Overview of the approach.

1. Calculation of the final criteria weights by combining AHP and Shannon entropy,
2. Calculation of the marginal utility scores according to the problem-specific utility functions,
3. Calculation of the final utility score and subsequent prioritizing the risk-measure path profiles in descending order,

4. Classification of the relevant measures into preventive, reactive, and non-distinguishable in accordance with [37],
5. Integration of the measures into the process schedule depending on the prior classification, resulting in a risk-treated process schedule.

The application of the approach produces three overarching results: the prioritized risk treatment paths, a catalog of categorized measures, and as the final result, the risk-treated production schedule.

4. Description of the Approach

This section introduces the details of the developed approach. Section 4.1 summarizes the measure selection process, which is based on a hybrid MCDM approach with AHP and entropy for criteria weighting and MAUT for the prioritization of the paths. Then, Section 4.2 outlines the process for measure classification into preventive and reactive by utilizing the categorization of energy flexibility measures in the VDI 5207 standard [37]. Finally, Section 4.3 integrates the selected measures in the production schedule with the help of a mixed-integer linear problem (MILP) and a branch-and-bound optimization, minimizing the cost of additionally purchased energy. The integration of measures is understood as the creation of new, risk-treated scheduling that, through preventive measures, contains less risk potential. In addition, reactive measures are integrated so that backup schedules are created that are used when faults occur.

4.1. Prioritization of the Risk Treatment Paths with a Hybrid MCDM Approach

For the risk treatment, measures must be integrated into the existing production schedule. To identify which measures to integrate, the risk treatment paths that contain different measures are ranked, and, subsequently, measures are extracted from the chosen path. As the risk treatment paths are evaluated in multiple dimensions, the resulting decision problem is a multi-criteria decision-making problem and thus requires complex decision-making methods to identify the best alternative from all the available paths. This paper introduces a hybrid MCDM approach that weights the criteria combining AHP [23] and Shannon entropy [40] and subsequently ranks the alternatives according to the rules of MAUT [41].

4.1.1. Normalization of the Decision Matrix

The model developed by Roth et al. [6] evaluates each path according to the trilemma of cost, energy flexibility, and a risk priority number. In this research paper, the trilemma is modified to fulfill the requirements of criteria selection in MCDM problems, as stated by Wang et al. [42]. The authors define five principles to be obeyed when identifying suitable criteria: (1) the systemic principle, (2) the consistency principle, (3) the independency principle, (4) the measurability principle, and (5) the comparability principle. The systemic principle demands a holistic assessment of the regarded problem. In every PPC system, costs are one of the key decision factors [12] and therefore need to be considered in the decision problem, hereinafter referred to as cost. Reinhart and Schultz [43] propose energy flexibility as a key indicator in the energy-oriented PPC, as it incorporates several energy-related variables in one indicator, hereinafter referred to as energy flexibility. Furthermore, this research is positioned in risk and fault management, and thus a risk-related dimension needs to be added to the problem to describe it holistically. The risk-related indicator is hereinafter referred to as risk reduction. The expert weighting of the three criteria additionally ensures that the criteria of the decision problem are in line with the decision-maker's goals; thus, criteria (1) and (2) are considered fulfilled. To demonstrate that principles (3) to (5) are fulfilled, a closer look at how the criteria are calculated is necessary.

The costs are calculated according to the cost model introduced by Roth et al. [6], which distinguishes between, e.g., production costs, logistic costs, and delay costs, and it divides these in turn into respective sub-categories, such as material or personnel costs. Costs are defined as the change in costs in the modified production schedule in relation

to the unmodified production schedule. The deviation is the sum of deviations in the above-mentioned cost categories. For every cost component, only measure-induced costs are regarded, resulting in the measure-induced change in costs ΔC_{tot}^M , where ΔC_{tot}^M is negative for cost savings, positive for increased costs, and “0” for unchanged costs [6]. Thus, for ΔC_{tot}^M , the lower the better. The cost thus indicates the costs incurred through the integration of the measures on the path. In practice, they therefore often correspond to the deviation from cost-optimal scheduling, which does not consider any risk effects.

The energy flexibility indicates the remaining flexibility available in the system to react to disruptions influencing the production system’s energy consumption. The regarded dimensions of energy flexibility are the potential to change loads or so-called energy flexibility states EF_{states} , the potential to shift the time of consumption EF_t , and the potential of energy-flexibility technologies, e.g., the use of storage facilities and flexible on-site generation EF_{tech} . The overall energy flexibility EF is then calculated by multiplying the three dimensionless components:

$$EF = EF_t \Delta EF_{states} \Delta EF_{tech} \tag{1}$$

A value higher than one indicates the desired high energy flexibility, whereas a value lower than one indicates undesired low energy flexibility.

Risk reduction indicates how much the risk is reduced by the integration of the measures into the production schedule, such as a change in production sequence or a shift of production starts. Risk reduction can thus be understood as the added value of the risk treatment approach and is defined as the absolute difference between the risk potential of the original plan and the resulting risk in the risk-threatened plan:

$$Risk\ reduction = |risk\ potential - resulting\ risk| \tag{2}$$

The risk potential of a path, on the other hand, is defined as the product of the probability of occurrence of the risks P_{Risk} it contains and the costs caused by the risks ΔC_{tot}^R , i.e., the damage [44–46]:

$$Risk\ potential = P_{Risk} \cdot \Delta C_{tot}^R \tag{3}$$

The resulting risk considers all path elements and thus consists of the product of the probability of occurrence of the risks and measures P and the total risk and measure costs of the path ΔC_{tot} :

$$Resulting\ risk = P \cdot \Delta C_{tot} \tag{4}$$

A high rating for the risk reduction is desired whereas the worst possible outcome is a risk reduction of zero, implying that no measures were integrated, and thus no potential risk was reduced.

Thus, all three criteria are in line with criteria (3), namely, independency. As for costs, a differentiation between measure and risk-induced costs is introduced, and the energy flexibility only considers cost-independent factors. Furthermore, all three criteria are quantified evaluations of the regarded system and thereby fulfill principle (4). To achieve comparability across the criteria that utilize different scales, normalization of the criteria ratings r_{ij} is necessary (criteria (5)). Depending on the direction of the criteria, Equation (5) or Equation (6) is applied [25], resulting in a normalized rating r_{ij}^* , with a value of one corresponding to the best possible alternative i and zero being the worst possible alternative i for the respective criterion j :

$$r_{ij}^* = \frac{r_{ij} - \min(r_{ij})}{\max(r_{ij}) - \min(r_{ij})}, \text{ for maximizing criteria} \tag{5}$$

$$r_{ij}^* = 1 + \frac{\min(r_{ij}) - r_{ij}}{\max(r_{ij}) - \min(r_{ij})}, \text{ for minimizing criteria} \tag{6}$$

The cost indicator ΔC_{tot}^M is to be minimized, and the energy flexibility indicator EF and the risk indicator risk reduction are to be maximized. The three criteria can now be graphically represented in a trilemma and are summarized in the decision matrix D with r_{ij}^* being the normalized rating for alternatives $i = 1 \dots n$ with respect to the criterion $j = 1 \dots m$:

$$D = \begin{bmatrix} r_{11}^* & \dots & r_{1m}^* \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1}^* & \dots & r_{nm}^* \end{bmatrix} \tag{7}$$

4.1.2. Subjective and Objective Criteria Weighting

For the subjective expert weighting, the three trilemma criteria AHP is applied. The AHP [23] is widely used in the literature and practice due to its straightforward application and high reliability, even in uncertain decision situations [47]. It is based on the principle of pairwise comparison, usually done by experts, and it serves as the subjective weighting method in the approach. The pairwise comparison results in an $n \times n$ decision matrix A with the elements a_{ij} , each of which indicates the relative weighting of two criteria, i and j . Values on the diagonal are equal to one. The remaining comparisons are filled with values from one to nine, and their inverse fractions for opposite dependencies [48]:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{a_{1n}} & \dots & 1 \end{bmatrix}, a_{ii} = 1, a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}}, a_{ij} \neq 0 \tag{8}$$

The following applies for the pairwise comparison: the higher the chosen value for criterion i , the higher the preference of criterion i over criterion j . For the comparison, a scale from one to nine is introduced, as it is effective in expressing preferences with sufficient precision and does not overwhelm the human decision-maker [49]. A verbal explanation of the nine levels is given in Table 2.

Table 2. Descriptive explanation of the AHP pair-wise comparison scale [49].

Intensity of Importance on an Absolute Scale	Definition	Explanation
1	Equal importance	Two activities contribute equally to the objective
3	Moderate importance of one over another	Experience and judgment slightly favor one activity over another
5	Essential or strong importance	Experience and judgment strongly favor one activity over another
7	Very strong importance	An activity is strongly favored and its dominance demonstrated in practice
9	Extreme importance	The evidence favoring one activity over another is of the highest possible order of affirmation
2, 4, 6, 8	Intermediate values between the two adjacent judgments	When compromise is needed
Reciprocals	If activity i has one of the above numbers assigned to it when compared with activity j , then j has the reciprocal value when compared with i .	

The choice of the exact preference level within the range is the decision-maker's. As outlined in Section 4.1.1, the three relevant criteria to compare are cost, EF, and risk reduction. The regarded factors, which influence the pairwise comparison, are, e.g., a client's importance, sustainability goals, risk attitude, and time criticality. Some examples of decisions are listed below:

- Risk reduction is more important than cost: the orders are particularly time-critical and for particularly important customers. Additional costs are therefore accepted for the reduction of risks.

- Energy flexibility is more important than risk reduction: the information available in the planning period is vague because rush orders could arrive. High remaining energy flexibility is required in the system.
- Cost is more important than risk reduction: the forecasts for penalties for deviations are low, and load peaks are not expected in the period under consideration. There is no great need to incur costs for risk reduction measures.

These comparisons can serve as a guide for decision-makers. Individual preferences may exist in a specific production system, and thus individual decisions must take into account the circumstances and requirements of the production system in question.

The calculation of the criteria weights w_{AHP} for the decision matrix A is carried out by multiplying its largest eigenvalue λ_{max} by the respective eigenvector \vec{v}_i :

$$w_{AHP} = \lambda_{max} \vec{v}_i, \text{ with } \lambda_{max} = \max_i \lambda_i \tag{9}$$

Finally, the consistency of the expert judgments is checked with the consistency ratio (CR). The inputs are assumed to be consistent if $CR \leq 0.1$ hold true; otherwise, the expert inputs must be revised. The CR is the fraction of the consistency index (CI) and random consistency index (RCI) as shown. The value of the RCI depends on the number of alternatives and was introduced by Dong [50]. Small inconsistencies are accepted, as human inputs are subject to error, especially with an increasing number of alternatives. Furthermore, if inconsistencies are small, they do not have a decisive influence on the result of the AHP.

In addition to the subjective weighting with AHP, an objective weighting takes place using the entropy (information theory) according to Wang et al. [42]. The aim of the entropy is to calculate a weighting that reflects the information and uncertainty contained in an individual criterion. The entropy e_j is calculated using Equation (10) and is based on the normalized decision matrix D (Equation (7)).

$$e_j = -k \sum_{i=1}^n r_{ij}^* \ln(r_{ij}^*), \quad j = 1 \dots m \tag{10}$$

where $k = \frac{1}{\ln(n)}$ and n the number of alternatives per criterion. The higher the entropy, the higher the uncertainty of the criterion, and the lower the weighting w_j should be. This relationship is represented in the calculation of the objective weighting $w_{Entr,j}$ [32,40,42]:

$$w_{Entr,j} = \frac{f_j}{\sum_{j=1}^m f_j} \text{ with } f_j = 1 - e_j \tag{11}$$

The final weighting w_j^{final} for a criterion is generated by multiplying the objective weighting $w_{Entr,j}$ and subjective weighting $w_{AHP,j}$ similar to [32,42]:

$$w_j^{final} = \frac{w_{Entr,j} \cdot w_{AHP,j}}{\sum_{j=1}^n w_{Entr,j} \cdot w_{AHP,j}} \tag{12}$$

The final weighting w_j^{final} combines the possibility of mapping individual preferences with the AHP and at the same time reduces the distortions by entropy due to the consideration of the contained information value of the different options. Since in this case there is sufficient data to calculate the entropy and an expert familiar with the use case is available, both weightings can easily be determined and combined.

4.1.3. Calculation of the Final Utility Scores and Aggregation into an Overall Utility Score

The MAUT assumes that every decision is based on maximizing one’s own utility [24]. The normalized decision matrix D (Equation (7), Section 4.1.1) forms the basis for calcu-

lating the marginal utility score of alternative i with criteria j $u_{ij}(r_{ij}^*)$. A universal utility function does not exist, but rather the chosen functions highly depend on the decision-maker. In general, the distinction between linear and exponential utility functions is widespread [24,25,51]. Figure 3 shows a depiction of the different utility functions. If small changes in the criteria values in the lower third are rated as significant, a concave utility function should be selected. If small changes in the upper third of all values are rated as significant, a convex utility function should be selected.

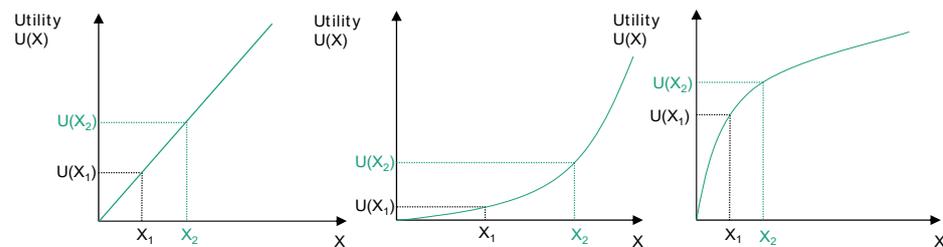


Figure 3. Utility functions (linear, convex, concave).

Equation (13) depicts the generalized form of the exponential utility function for the marginal utility score u_{ij} , where x depends on the decision-maker’s utility with $x < 1$ for a concave function and $x > 1$ for a convex function [25].

$$u_{ij}(r_{ij}^*) = \frac{\exp((r_{ij}^*)^x) - 1}{\exp(1) - 1} \tag{13}$$

If the distribution is even, a linear utility function should be selected:

$$u_{ij}(r_{ij}^*) = r_{ij}^* \tag{14}$$

To identify a decision-maker’s underlying utility function, direct methods or indirect methods can be applied [24]. With direct methods, the decision-maker answers direct questions about his or her preferences through ratings or preferences on lotteries, etc. Indirect methods can be versions of additive utility methods, which are based on linear programming [52]. If it is not possible to define the decision-maker’s risk preference for a trilemma criterion, a neutral utility function should be chosen. As a result, a new decision matrix containing the marginal utility scores is created:

$$U_{ij}(r_{ij}^*) = \begin{pmatrix} U(r_{11}^*) & \cdots & U(r_{1m}^*) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ U(r_{n1}^*) & \cdots & U(r_{nm}^*) \end{pmatrix} \tag{15}$$

Eventually the final utility scores U_i are calculated for each risk treatment path, i.e., each alternative, with the marginal utility scores $U_{ij}(r_{ij}^*)$ and the final weighting w_j^{final} :

$$U_i = \sum_{j=1}^m U_{ij}(r_{ij}^*) \cdot w_j^{final}, \quad i = 1 \dots n \tag{16}$$

Arranging the risk treatment paths descending from $U_{i,max}$ to $U_{i,min}$ results in a prioritized list of all paths and thus in the selection of measures that in the next steps are categorized and integrated into the production schedule.

4.2. Classification of Relevant Measures

To integrate the identified measures into the production schedule, it is first necessary to distinguish between preventive and reactive measures in order to create a catalog of

categorized measures. The literature suggests that the main differentiator is the timing of the measure considering the occurring damage [7,25,29].

- Reactive measures are only used when damage has already occurred. The aim is to keep the resulting damage and the associated costs as low as possible. Due to the immediate implementation, short-term changes in the production schedule must be expected.
- Preventive measures are used to avoid potential damage and its financial impact as well as the reduction of the likelihood of occurrence. They are implemented at an early stage before the fault occurs. This excludes the possibility of changes to the production schedule with short notice.

In addition to differentiation according to the time of implementation of a measure, economic aspects must be considered. Preventive measures should generally be preferred in the case of high expected costs for reactive measures [53]. The advantage of taking both categories of measures into account in this approach is that the preventive measures reduce the impact and likelihood of potential faults. At the same time, the planning of reactive measures creates an information base for the reactions if faults still occur, so that a solution does not have to be sought under time pressure.

A generalized and thorough overview of relevant measures for energy-flexible production is given in VDI 5207 Part 1 [37]. The distribution of the measures within the three implementation levels of the energy-flexible factory serves as a reference point for selecting relevant measures for operational risk management (Figure 4).

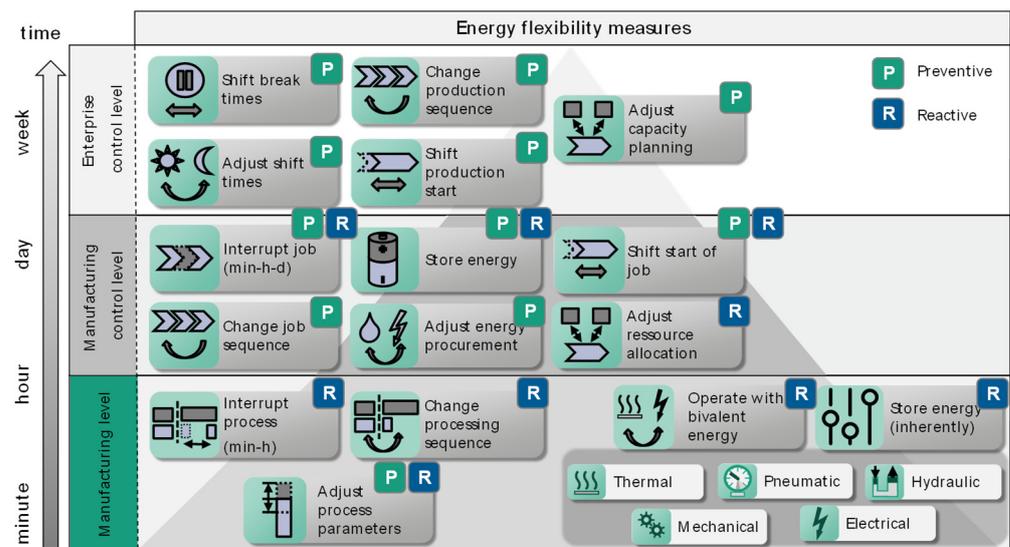


Figure 4. Energy-flexibility measures and their classification into preventive (P) and reactive (R) measures. Figure based on VDI 5207 Part 1 [37]. Reproduced with permission of the Verein Deutscher Ingenieure e. V.

The different implementation levels in Figure 4 imply different time horizons that serve as orientation for dividing the measures into preventive and reactive. Still, for some measures it is not possible to assign them to only one category without knowing the specific production context. Thus, these measures are marked as preventive and reactive. At the short-term manufacturing level, all measures are considered reactive except for the adjustment of process parameters, which can also be an activity planned in advance. At the manufacturing control level, most of the measures available are preventive, as the regarded time horizon ranges from hours to days and thus implies longer advance planning. The manufacturing control’s measures further influence the measures at the lower level, and preventive planning of these should be done whenever possible. Nonetheless, in the event of severe disruption, a job may be interrupted reactively, and, if available, energy storage

will be used. The enterprise control level only consists of preventive measures due to the necessary longer planning horizon of days to weeks. Finally, it should be noted that this division into preventive and reactive measures is a general orientation because in the wide variety of different industries with specific planning and production systems, the respective measures may differ.

4.3. Integration of Preventive and Reactive Measures in the Production Schedule

Once measures have been successfully divided into reactive and preventive, implementation of the measures into the production schedule needs to be planned. The rescheduling of reactive measures is considered to be segment-based rescheduling, similar to Toba [54]. This means that for reactive measures, only the segments after the potential risk occurrence are affected and rescheduled, whereas for preventive measures, the measure execution must be prior to the expected time of disruption to be effective. Therefore, the implementation of preventive measures may affect the entire production schedule.

The production schedule needs to be modified so that the previously selected measures are integrated as well as they can be, taking into account the logistical goals of the production system and the boundary conditions for the planned energy consumption. Due to the differentiation into preventive and reactive measures, new production schedules must be generated. These are the modified production schedule with all preventive measures, which replaces the original plan. Furthermore, a backup plan is drawn up for each reactive measure implemented, as the reactive measures only come into effect when a disruption occurs.

The integration of measures is formalized as a MILP, which can be solved through branch-bound-and-cut optimization, e.g., in MATLAB® [54,55]. For the present problem, it is important to aim for short computation times to ensure the applicability of the approach in operational practice. This can be achieved by reducing complexity wherever the problem setting allows it. The goal of this optimization is to integrate the measures energy optimally and thereby create a risk-treated, energy-optimal production schedule by the addition of preventive and reactive measures.

In the course of this section, the term *production* schedule refers to a plan that aggregates all relevant jobs on all workstations for the respective production period under consideration of resources and sequence restrictions, whereby one *job* contains a product's production steps, i.e., the necessary workstations including durations, sequence restrictions, and resource consumptions. The workstations come with capacity restrictions, and not every job is necessarily processed on every workstation. The initial production schedule prior to risk treatment is assumed to be available and energy-optimal, hereinafter referred to as energy-oriented PPC.

Measures are thus either treated as jobs and are fixed in their allocation to one workstation or modify the load and time dimensions of jobs scheduled by the energy-oriented PPC. When scheduling the measures, the risk-treated energy-oriented PPC must still comply with logistical and energy-consumption target values. Consequently, two options remain for the risk treatment:

1. An extension of the original energy-oriented PPC by risk-specific target values and constraints leading to a detailed and comprehensive optimization problem.
2. Setting the results of the initial energy-oriented PPC as an input variable for an optimization problem that is limited to the implementation of measures.

Option (1) results in correspondingly higher computing times due to increased complexity. This also leads to more difficulties in understanding the solution process and thus lowers the acceptance of the approach for the end users. Option (2), on the other hand, results in a non-optimal solution, but with expected significantly shorter calculation times, thus increasing flexibility in the application of the approach. It is also advantageous that the energy-oriented PPC is not redesigned but expanded. This increases understanding and acceptance if the generated solution fulfills the end user's standards. Due to the predominant advantages of option (2), this will be pursued further below.

Thus, the optimization problem consists of an energy-optimal production schedule as input that can be generated using different approaches, e.g., those described in Section 2.1. In addition, the measures of the chosen risk treatment path need to be scheduled to create the risk-treated production plans.

In order to meet the logistical goals and to avoid delays, the end times of the jobs scheduled in the energy-oriented PPC are fixed and block the workstations for the scheduling of measures in these time periods.

Usually, when creating an energy-oriented production plan, a cost-optimal result is sought after the variable price forecasts. The electricity demand planned and procured in this way should be consumed within tolerances in order to avoid high penalties. As part of the risk treatment, price fluctuations in the markets are no longer of central importance, as the plan is already generated, but the time-dependent penalties for deviations from the originally purchased electricity consumption have to be focused on now.

Thus, the objective function of the optimization problem minimizes the quantity deviation cost (QDC) QDC_t for each time unit t that arises from a deviation of the actual energy consumption from the forecasted load profile Δpow_t .

The QDC is substituted by the forecast for reBAP, which stands for “regelzonenübergreifender einheitlicher Bilanzausgleichsenergiepreis” and assigns a uniform price to the balancing energy that was necessary in the past. The reBAP is calculated in retrospect for every quarter-hour of a day. If no suitable forecasts are available for the reBAP, intraday market forecasts can also be used, as the amount gives an impression of the energy availability and the demand and thus the level of the penalty costs caused by deviations.

The objective of the optimization is to minimize the QDC, which arises due to the deviations from the planned load profile. This is shown in the target function with the deviation Δpow_t and the QDC_t at the respective point in time t .

$$\text{Minimize } \sum_{t \in T} (\Delta pow_t \cdot QDC_t) \tag{17}$$

To ensure logistic targets are met, a job must start early enough to not miss any due dates:

$$start_{ks} \leq end_{ks} - duration_{ks}, \forall i \in I, k \in K, \tag{18}$$

where $start_{ks}$ describes the start time of job k on working station s and end_{ks} the due date of the job k on station s . The duration of job k on station s is described by $duration_{ks}$.

To calculate the actual energy consumption $cons_t$, the binary x_{kit} , that is, one if job k is allocated to workstation s in time unit t and zero otherwise, is multiplied by the workstation and job-specific power consumption $Power_{ks}$:

$$cons_t = \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^l Power_{ks} \cdot x_{kst}, \forall t \in T \tag{19}$$

Additionally, it must be ensured that the measure integration does not lead to the peak loads being exceeded; thus, the total consumption $cons_t$ must be smaller than the maximum allowed peak load $Peak_{max}$ for every time unit

$$cons_t \leq Peak_{max}, \forall t \in T. \tag{20}$$

Finally, the deviation in energy consumption is calculated as the total consumption minus the planned consumption $Power_t^{planned}$.

$$\Delta pow_t = cons_t - Power_t^{planned}, \forall t \in T \tag{21}$$

The optimization is performed twice—once to generate the modified production schedule and once to generate the backup plan. Figure 5 depicts schematically how the optimization improves the handling of disruptions. In the above production schedule

without prior risk treatment, a disruption leads to a spontaneous decision to post-process. This leads to the annual maximum load being exceeded, as shown in the adjacent diagram of the load profile. With the risk treatment shown in the lower area of Figure 5, the possible disruption is considered in advance with a backup plan, containing reactive measures for the case of the occurrence of the fault. The pause on station 4 enables post-processing to compensate for the disruption without exceeding the peak load. To create the risk-treated plan in the above-mentioned approach, only the affected jobs are rescheduled.

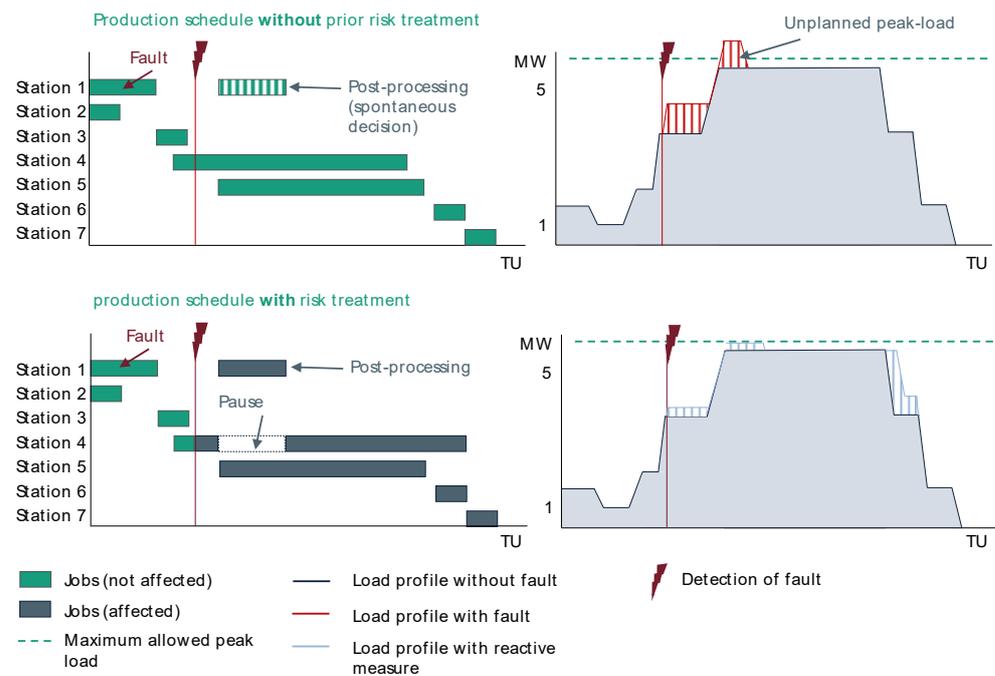


Figure 5. Schematic initial production schedule and the effects of disturbances on the load profile.

5. Application of the Approach

The use case for demonstrating the approach is located in the foundry industry. As the melting processes are considered especially energy-intensive, the foundry industry can significantly influence the power grid [56]. In the use case, four furnaces are used to melt raw iron, iron ore, and scrap iron. The ladles are transported to the casting fields via forklifts. Molds and cores are produced on site. The whole process of melting, molding, core preparation, casting, and post-processing is considered for a time period of 65 time units (TU), which is equivalent to 16.25 h. A detailed description of the use case can be found in Roth et al. [6].

The approach requires the risk treatment path profiles obtained in Roth et al. [6] as well as process-specific risk and measure data, which are gathered with the help of expert interviews and failure mode and effects analysis (FMEA). Six risks with their potential extents of damage and probability of occurrence were identified and are listed with the related nine different measures in Table 3. At this point, it is important to note that risks that are directly related to quality management processes were not considered, as they are not in the sphere of influence of the PPC.

Table 3. Risk inventory with the frequency of occurrence, extent of damage, and the related measures.

ID	Risk (Frequency)	Extent of Damage	ID	Measure
R1	Mold for a small part is faulty—exchange of mold pattern is possible (1 per week)	Time delay to casting and subsequent processes	M1	Switch to casting panel with identical material requirements
		Additional post-processing	M2	Casting with increased post-processing effort
R2	Mold for a small part is faulty—exchange of mold pattern is not possible (1 per week)	Additional order to be planned; changed load profile	M3	Preparation of an additional mold
		Additional post-processing	M2	Casting with increased post-processing effort
R3	Core for a small part is faulty—exchange of core box is possible (2 per week)	Time delay to casting and subsequent processes	M1	Switch to casting panel with identical material requirements
		additional post-processing time	M2	Casting with increased post-processing effort
R4	Core for a small part is faulty—exchange of core box is not possible (2 per week)	Additional order to be planned; changed load profile	M4	Preparation of an additional core
		Additional post-processing	M2	Casting with increased post-processing effort
R5/R6/R7 *	Furnace failure (2 per year)	Delay melting	M5	Adjust furnace utilization if an unoccupied furnace is available
		Delay melting	M6	Adjust process start
		Delay melting; changed load profile	M7	Adjust parameter melting temperature and duration
			M8	Interrupt melting process (only possible for small TUs)
R6	Forklift failure (5 per week)	Time delay in follow-up processes	M9	Provision of a spare forklift
			M10	Switching to transport trolleys

* This risk applies to every furnace individually.

The measures are further subdivided into process-altering and supplementary process measures, e.g., M2: casting with increased post-processing effort alters the post-processing, and M3: preparation of an additional mold is a supplementary process to be planned in addition to the scheduled mold preparation processes. For every process-altering measure, the measure-induced deviation in duration and load profile, and for every supplementary process measure, the absolute duration and load profile is filed.

Additional input parameters for the scheduling are the planned load profile, the QDC, and the initial energy-optimal production schedule, including production-specific requirements.

In the following, the application of the approach is described. The section is structured based on the three main steps of the approach, with the calculation of the final criteria weights, the classification of the relevant measures, and, finally, the integration of the measures.

5.1. Prioritization of the Risk Treatment paths

For the measure selection, the AHP periodization matrix and utility functions for the three criteria of cost, risk reduction, and energy flexibility are needed. An interactive MATLAB[®] Live Script is created as the user interface. For optimization, MATLAB[®] offers an Optimization Toolbox[™] that can solve MILPs efficiently. The approach is implemented in MATLAB[®] version 9.6.0.1472908 (R2019a). All input data are stored in Microsoft[®] Excel[®] and can therefore be easily modified.

Firstly, all ratings for the paths created in advance using the approach in Roth et al. [6] are normalized, resulting in trilemma criteria for every path. In Figure 6, the trilemma for

three exemplary paths is depicted. To compare the three paths, their criteria are shown in the diagram below on the right.

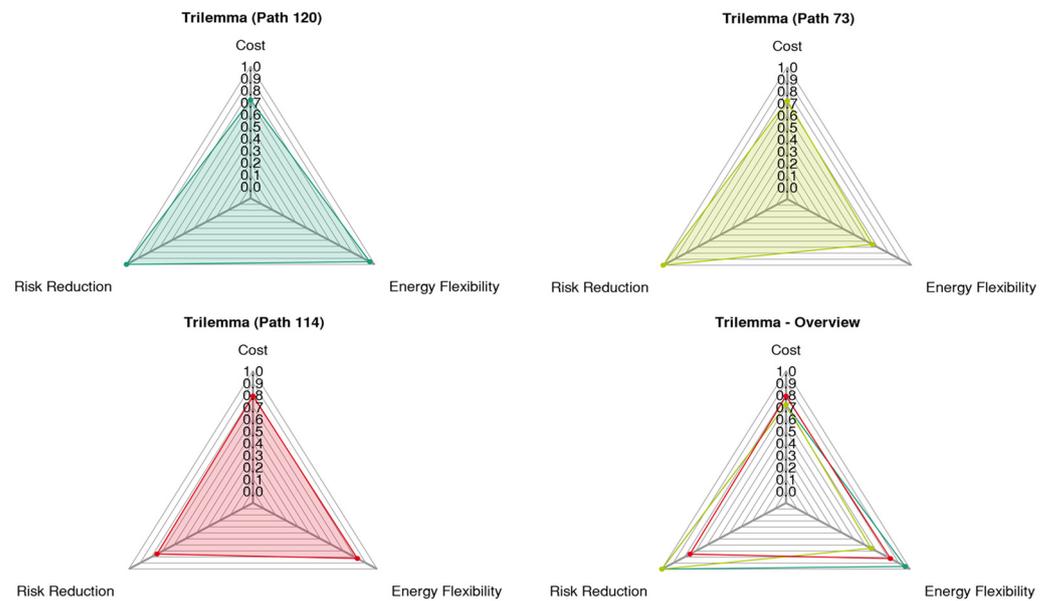


Figure 6. Trilemma of three risk treatment paths including an overview.

With the involvement of the experts from the production system, the approach to weighting the trilemma criteria was then carried out in order to be able to categorize the paths according to their suitability. For the decision matrix in Table 4, the principal eigenvector according to the AHP [23] determines the weighting of 0.0679 for cost, 0.7703 for energy flexibility, and 0.1618 for risk reduction, according to the assessment of the experts. This is due to a high need for the remaining energy flexibility in the system for reactive measures, since the orders are particularly tightly timed in the period under consideration, and failure to meet deadlines is associated with high penalties. Risk reduction is also given a higher weighting than cost; additional costs for measures are therefore accepted in favor of risk reduction.

Table 4. Decision matrix for the AHP.

	Cost	Energy Flexibility	Risk Reduction	Final Weighting
Cost	1	1/9	1/3	0.0679
Energy flexibility	9	1	6	0.7703
Risk reduction	3	1/6	1	0.1618

The objective weighting, applying Shannon entropy, results in a weighting of 0.0245 for cost, 0.0710 for energy flexibility, and 0.9044 for risk reduction, assuming all values are normalized according to Equation (5) or Equation (6). The proportionally high weighting of risk reduction in comparison to the two remaining criteria highly influences the final weighting obtained by multiplicative aggregation. The large deviation in values is not uncommon, as subjective and objective weighting are generated independently. Thus, the final weighting results in 0.0082 for cost, 0.2700 for energy flexibility, and 0.7218 for risk reduction.

For this use case, the utility functions based on the underlying data structure were selected, so that differences in ratings are amplified. This is achieved by choosing a convex utility function when most data points lie within the upper third of the scale. When most data points lie within the lower third of the scale, a concave utility function is applied. For

the remaining third, a linear function was utilized. Thus, for cost and energy flexibility, a convex utility function was chosen and for risk reduction a linear utility function.

$$u_{ij}(r_{ij}^*) = \frac{\exp((r_{ij}^*)^2) - 1}{\exp(1) - 1} \tag{22}$$

Applying the respective utility function to the decision matrix results in marginal utility scores for every alternative and every criterion. The final utility scores are calculated by weighted sums, and the paths, i.e., the alternatives, are ranked in descending order. Table 5 depicts the top three paths with their marginal and final utility scores under the assumption of the previously generated final weighting.

Table 5. Marginal and final utility scores of the three best performing paths.

Criteria	Marginal Utility Score			Final Utility Score
	Cost	Energy Flexibility	Risk Reduction	
Weight	0.0082	0.2700	0.7218	
No. 120	0.3930	0.8689	1.0000	0.9596
No. 73	0.3930	0.3107	1.0000	0.8089
No. 114	0.5028	0.5677	0.7507	0.6992

The top three paths contain the following measures: Path 120 contains R4 (core for a small part is faulty) and M4 (preparation of an additional core), path 73 contains R7 (delay melting) and M5–7 (adjust furnace utilization, adjust process start, adjust parameter melting temperature and duration), and path 114 contains only M7 (adjust parameter melting temperature and duration).

The selection of paths that contain little or no risk can be explained by the fact that the risk reduction criterion shows a strong accumulation in its assessments and is therefore generally avoided. The selection is therefore shifted to the criteria costs and EF, which are then rated higher. The distribution of the risk reduction depends crucially on the input variables of the extent of the damage and the probability of occurrence of the damage. During the application, the conscientious collection of this data is therefore of high relevance for the reliable selection of suitable paths. Furthermore, the measures contained in the prioritized paths must be compared and selected for integration into the production plan.

5.2. Classification of Relevant Measures

To showcase the potential of the risk reduction measures, the four measures (Table 6) from the prioritized paths were selected for the measures catalog to be integrated into the production schedule. The division of the measures into preventive and reactive is based on the allocation of the presented categorization of energy flexibility measures. For example, M5 can be assigned to the energy flexibility measure “adjust resource allocation” and is, therefore, a reactive measure.

Table 6. Catalog with four categorized measures.

ID	Description	Type	Effect on the Process
M4	Preparation of an additional core	Reactive	Altering
M5	Adjusting furnace utilization if an unoccupied furnace is available	Reactive	Supplementing
M6	Adjust process start furnace	Preventive	Supplementing
M7	Adjust parameter melting temperature and duration of furnace	Preventive	Supplementing

M7 is assigned to the energy flexibility measure “adjust process parameters” for which a decision must be made depending on the production situation. In the application, the process parameters should only be adjusted if a fault actually occurs and is therefore defined as a reactive measure.

5.3. Integration of Preventive and Reactive Measures in the Production Schedule

Figure 7 shows the result of the scheduling in the form of a risk-treated production plan for the allocation of orders on the workstations.

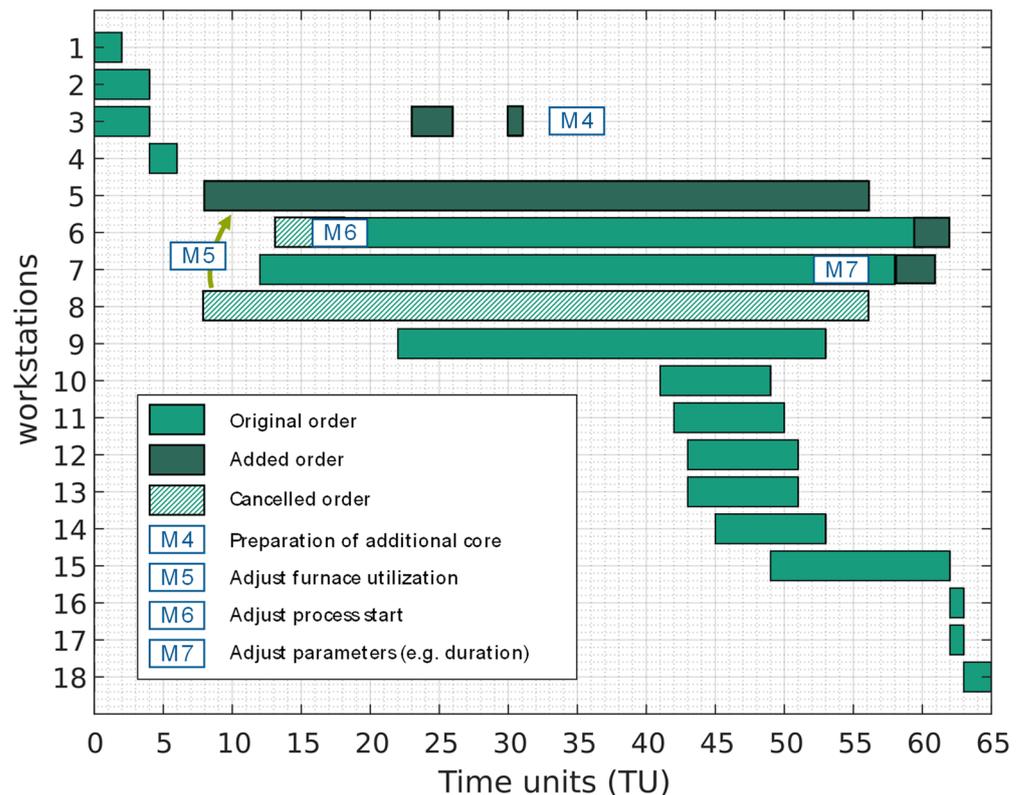


Figure 7. Risk-treated production schedule Gantt chart with marked reactive and preventive measures.

In order to counter R7, the failure of furnace 4, causing a delayed melting, the reactive measure M5 was implemented in the backup plan, which is only used when the risk arises. Measure M5, the utilization of another unoccupied furnace, can then be implemented by the switch from furnace 4 (workstation 8) to furnace 1 (workstation 5) if R7 occurs.

In addition, M6 and M7 were implemented in the plan as preventive measures, which means that they replace the original production plan.

1. M6 (adjustment of the process start) is implemented in the melting process on furnace 2 (workstation 6). This avoids possible warm-up times in furnace 2 due to a delayed casting time in the event of the occurrence of R7, as furnace 2 is used for the pre-melting for furnace 4.
2. M7 is implemented by the adjustment of temperature (decreased) and thus an extended duration of the melting process on furnace 3 (workstation 7). This is necessary in order to synchronize the termination of the melting processes on the furnaces for the casting.

As a reaction to a faulty core, which was identified as R4, the reactive measure M4, the preparation of an additional core, was scheduled in the backup plan to create a replacement core on workstation 3. Since the core creation can be carried out flexibly in a longer time interval, it was placed at times with lower reBAP prices.

Figure 8 shows the electrical load curve across the TU. The yellow dashed line shows the original load profile. The reBAP forecasts, which affect the timing of measures, are shown in red for orientation. The green load profile represents the risk-treated load. The short-term peaks for the creation of the additional core (M4), as well as the reduction of the load by adjusting parameters (M7), are the effects when the reactive measures are used. With the preventive measure M6, the load profile changes as an effect of the delayed start. Measure M5 with the changed utilization of the furnaces has no effect on the electrical load profile.

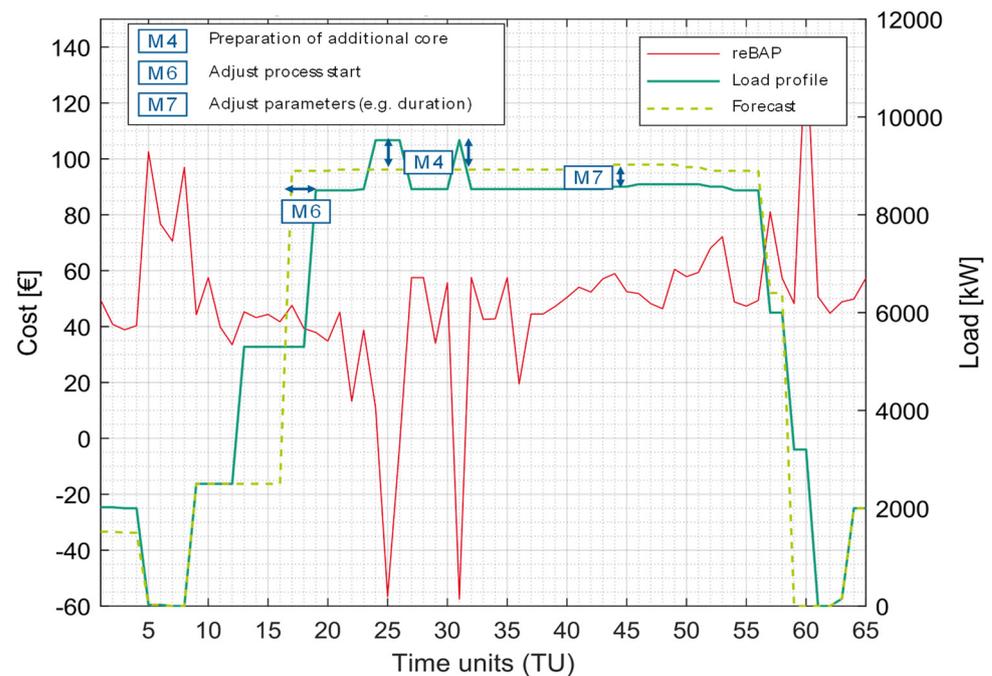


Figure 8. Load profile before (light green dashed line) and after the measure implementation (dark green line). For reference, the reBAP price is included.

5.4. Discussion

The application of the approach for the use case of a foundry resulted in a suitable risk treated energy-oriented production plan. The advantages over a situational decision in the event of faults as described in the state of the art lie in the consideration of the interactions of all known risks and measures in advance. In addition, preventive measures to reduce the probability of occurrence or the extent of damage are made possible.

The prerequisite for applicability is an acceptable level of effort in carrying out the risk treatment, especially since experts from different areas must be involved. By the introduction of this specific approach for the energy-oriented PPC, the effort required to select and adapt general approaches from the literature is reduced. Furthermore, the adaption to the energy-oriented PPC offers the possibility of automating the individual steps by the future development of software. The approach first requires a weighting of criteria for the selection of paths. Some manual steps are necessary here, which was supported by convenient graphical user interfaces for inputs. In addition, this weighting is only required occasionally, for example, if there have been changes in the production program or customer requirements. The classification of measures, which is also done manually, rarely needs to be adjusted after an initial assignment in most cases. The selection and integration of paths are then required more frequently, which is why these processes were more automated through the scheduling.

The approach was applied using the representative use case of a foundry. In further applications to use cases of other companies and sectors, the transferability of the approach should be tested and increased in order to take into account the inhomogeneity of the

industrial sectors. In a long-term study, the effort of the application of the approach should be compared with the overall benefit through savings from avoided or reduced damage in the event of disruptions. This has remained open in the present use case due to a short period of application.

6. Conclusions and Outlook

As described in the introduction, industry is facing major challenges due to increasing energy prices. Energy flexibility measures can lead to cost reductions by adapting the load to the available energy. Faults in the often complex production system lead to high additional costs, so that risk treatment of production schedules is recommended.

This approach can offer significant added value with manageable effort through the structured and reliable consideration and treatment of risks. Applied in industrial practice, this can encourage the willingness of industry to be energy-flexible. Furthermore, risk treatment leads to the better handling of faults and lower subsequent costs for the company. Thus, planning security for the operation of the energy system with a high proportion of volatile feed-in increases.

To improve the approach in terms of ease of use and reliability, the following options have been identified:

- The approach assumes that the final selection of measures is monitored by a human decision-maker. It is also assumed that a manual definition of risk preferences and classification of measures is desired. As a result, the approach cannot be carried out fully automatically. This would require AHP, as well as the selection of the utility function to be replaced by data-based processes and machine learning.
- The optimization considered uses constraints to describe the restrictions of the production system. In the case of more complex production systems, it may be necessary to use meta-heuristics such as genetic algorithms in order to be able to map all boundary conditions and interactions.
- After the reactive measures have been carried out, the effects should be put in a feedback loop in order to take the findings into account when developing reactive measures in risk treatment. The approach should be expanded to include this functionality. The results of the feedback loop can, i.e., be used for the calculation of Bayesian networks described in Roth et al. [6].
- The input and output data of the approach can be adapted in such a way that interfaces to the common systems in industrial companies can be implemented more easily. For example, order data for scheduling can be transferred from enterprise resource planning systems and load profiles of workstations from the energy management system, and the risk-treated production plans can be visualized by the manufacturing execution system. Thereby, the effort required for the application can be further reduced.

Author Contributions: Conceptualization: S.R.; methodology: S.R. and M.H.; software: M.H.; validation: S.R. and M.H.; formal analysis: S.R. and M.H.; investigation: S.R. and M.H.; resources: S.R. and M.H.; data curation: S.R. and M.H.; writing—original draft preparation: S.R. and M.H.; writing—review and editing: J.S. and G.R.; visualization: S.R. and M.H.; supervision: J.S. and G.R.; project administration: S.R.; funding acquisition: G.R. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was funded by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF), grant number 03SFK3G1-2.

Acknowledgments: The authors gratefully acknowledge the financial support of the Kopernikus-Project “SynErgie” from the Federal Ministry of Education and Research (BMBF), and the supervision of the project by the Projektträger Jülich (PTJ) project management organization. Further thanks are due to Steffen Klan and Christoph Hartmann from Fraunhofer IGCV for their support with the use case of the foundry.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft. BDEW-Strompreisanalyse Januar 2022—Haushalte und Industrie. 2022. Available online: https://www.bdew.de/media/documents/220124_BDEW-Strompreisanalyse_Januar_2022_24.01.2022_final.pdf (accessed on 20 April 2022).
2. Forschungsstelle für Energiewirtschaft. Deutsche Strompreise an der Börse EPEX Spot in 2020. Available online: <https://www.ffe.de/veroeffentlichungen/deutsche-strompreise-an-der-boerse-epex-spot-in-2020/> (accessed on 3 January 2022).
3. EPEX SPOT. Market Data. Available online: <https://www.epexspot.com/en/market-data> (accessed on 3 January 2022).
4. Keller, F.; Schultz, C.; Braunreuther, S.; Reinhart, G. Enabling Energy-Flexibility of Manufacturing Systems through New Approaches within Production Planning and Control. *Procedia CIRP* **2016**, *57*, 752–757. [CrossRef]
5. Schuh, G.; Stich, V. *Produktionsplanung und—Steuerung 1: Grundlagen der PPS*, 4. Aufl.; Springer: Berlin, Germany, 2012; ISBN 978-3-642-25422-2.
6. Roth, S.; Kalchschmid, V.; Reinhart, G. Development and evaluation of risk treatment paths within energy-oriented production planning and control. *Prod. Eng. Res. Dev.* **2021**, *15*, 413–430. [CrossRef]
7. Schwartz, F.; Voß, S. Störungsmanagement in der Produktion—Simulationsstudien für ein hybrides Fließfertigungssystem. *Z. Plan. Unternehm.* **2004**, *15*, 427–447. [CrossRef]
8. Greve, J. Störungen im Industriebetrieb: Eine klassifizierende untersuchung der Störungen und Analyse des Störverhaltens betrieblicher Systeme unter Anwendung kybernetischer Betrachtungsweise. Ph.D. Thesis, Technische Hochschule, Darmstadt, Germany, 1970.
9. Schwartz, F. *Störungsmanagement in Produktionssystemen*; Shaker: Aachen, Germany, 2004; ISBN 3832230882.
10. Heil, M. *Entstörung Betrieblicher Abläufe*; Springer: Wiesbaden, Germany, 1995; ISBN 978-3-8244-6100-4.
11. Simon, D. *Fertigungsregelung durch Zielgrößenorientierte Planung und Logistisches Störungsmanagement*; Springer: Berlin, Germany, 1995; ISBN 978-3-540-58942-6.
12. Pielmeier, J. System zur Ereignisorientierten Produktionssteuerung. Ph.D. Thesis, Technical University of Munich, Munich, Germany, 2019.
13. Schultz, C. System zur Energieorientierten Produktionssteuerung in der Auftragsbezogenen Fertigung. Ph.D. Thesis, Technical University of Munich, Munich, Germany, 2018.
14. Rösch, M.; Lukas, M.; Schultz, C.; Braunreuther, S.; Reinhart, G. An approach towards a cost-based production control for energy flexibility. *Procedia CIRP* **2019**, *79*, 227–232. [CrossRef]
15. *DIN ISO 31000:2018*; Risikomanagement—Leitlinien. ISO: Geneva, Switzerland, 2018.
16. Oduoza, C.F. Framework for Sustainable Risk Management in the Manufacturing Sector. *Procedia Manuf.* **2020**, *51*, 1290–1297. [CrossRef]
17. Klöber-Koch, J.; Braunreuther, S.; Reinhart, G. Predictive Production Planning Considering the Operative Risk in a Manufacturing System. *Procedia CIRP* **2017**, *63*, 360–365. [CrossRef]
18. Abele, M.; Unterberger, E.; Friedl, T.; Carda, S.; Roth, S.; Hohmann, A.; Reinhart, G. Simulation-based evaluation of an energy oriented production planning system. *Procedia CIRP* **2020**, *88*, 246–251. [CrossRef]
19. Schultz, C.; Sellmaier, P.; Reinhart, G. An Approach for Energy-oriented Production Control Using Energy Flexibility. *Procedia CIRP* **2015**, *29*, 197–202. [CrossRef]
20. Golpîra, H. Smart Energy-Aware Manufacturing Plant Scheduling under Uncertainty: A Risk-Based Multi-Objective Robust Optimization Approach. *Energy* **2020**, *209*, 118385. [CrossRef]
21. Coca, G.; Castrillón, O.D.; Ruiz, S.; Mateo-Sanz, J.M.; Jiménez, L. Sustainable evaluation of environmental and occupational risks scheduling flexible job shop manufacturing systems. *J. Clean. Prod.* **2019**, *209*, 146–168. [CrossRef]
22. Simon, P.; Zeiträg, Y.; Glasschroeder, J.; Tomothy, G.; Reinhart, G. Approach for a Risk Analysis of Energy Flexible Production Systems. *Procedia CIRP* **2018**, *72*, 677–682. [CrossRef]
23. Saaty, T.L. The Analytic Hierarchy Process: Decision Making in Complex Environments. In *Quantitative Assessment in Arms Control*; Springer: Boston, MA, USA, 1984.
24. Ishizaka, A.; Nemery, P. *Multi-Criteria Decision Analysis: Methods and Software*; Wiley: Chichester, UK, 2013; ISBN 978-1-119-97407-9.
25. Alinezhad, A.; Khalili, J. *New Methods and Applications in Multiple Attribute Decision Making (MADM)*; Springer: Cham, Switzerland, 2019; ISBN 978-3-030-15009-9.
26. Vujicic, M.; Papic, M.; Blagojevic, M. Comparative analysis of objective techniques for criteria weighing in two MCDM methods on example of an air conditioner selection. *Tehnika* **2017**, *72*, 422–429. [CrossRef]
27. Wang, M.; Lin, S.-J.; Lo, Y.-C. The comparison between MAUT and PROMETHEE. In Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, Macao, China, 7–10 December 2010; pp. 753–757. [CrossRef]
28. Zanakis, S.H.; Solomon, A.; Wishart, N.; Dubliss, S. Multi-attribute decision making: A simulation comparison of select methods. *Eur. J. Oper. Res.* **1998**, *107*, 507–529. [CrossRef]
29. Zavadskas, E.K.; Turskis, Z.; Kildienė, S. State of art surveys of overviews on MCDM/MADM methods. *Technol. Econ. Dev. Econ.* **2014**, *20*, 165–179. [CrossRef]
30. Doczy, R.; AbdelRazig, Y. Green Buildings Case Study Analysis Using AHP and MAUT in Sustainability and Costs. *J. Archit. Eng.* **2017**, *23*, 5017002. [CrossRef]

31. Şahin, M. A comprehensive analysis of weighting and multicriteria methods in the context of sustainable energy. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* **2020**, *8*, 591–1616. [CrossRef]
32. Feizi, F.; Karbalaeei-Ramezani, A.; Tusi, H. Mineral Potential Mapping Via TOPSIS with Hybrid AHP–Shannon Entropy Weighting of Evidence: A Case Study for Porphyry-Cu, Farmahin Area, Markazi Province, Iran. *Nat. Resour. Res.* **2017**, *26*, 553–570. [CrossRef]
33. Ren, J.; Liang, H.; Chan, F.T. Urban sewage sludge, sustainability, and transition for Eco-City: Multi-criteria sustainability assessment of technologies based on best-worst method. *Technol. Forecast. Soc. Chang.* **2017**, *116*, 29–39. [CrossRef]
34. Muqimuddin; Singgih, M.L. Integrated FMEA-MCDM For Prioritizing Operational Disruption in Production Process. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* **2020**, *847*, 12028. [CrossRef]
35. Turskis, Z.; Goranin, N.; Nurusheva, A.; Boranbayev, S. Information Security Risk Assessment in Critical Infrastructure: A Hybrid MCDM Approach. *Informatica* **2019**, *30*, 187–211. [CrossRef]
36. Wang, L.-E.; Liu, H.-C.; Quan, M.-Y. Evaluating the risk of failure modes with a hybrid MCDM model under interval-valued intuitionistic fuzzy environments. *Comput. Ind. Eng.* **2016**, *102*, 175–185. [CrossRef]
37. VDI Department Factory Planning and Operation. *VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V. VDI 5207 Energy-flexible factory, Part 1 Fundamentals*; VDI: Berlin, Germany, 2020.
38. Verhaelen, B.; Kehm, F.; Häfner, B.; Lanza, G. Reaktion auf Störungen globaler Produktionsanläufe. *ZWF* **2020**, *115*, 492–496. [CrossRef]
39. Hernández-Chover, V.; Castellet-Viciano, L.; Hernández-Sancho, F. Preventive maintenance versus cost of repairs in asset management: An efficiency analysis in wastewater treatment plants. *Process Saf. Environ. Prot.* **2020**, *141*, 215–221. [CrossRef]
40. Shannon, C.E.; Weaver, W. *The Mathematical Theory of Communication*; University of Illinois Press: Urbana, IL, USA, 1975; p. c1949. ISBN 0252725484.
41. Keeney, R.L.; Raiffa, H. *Decisions with Multiple Objectives*; Cambridge University Press: Cambridge, MA, USA, 2014; ISBN 9781139174084.
42. Wang, J.-J.; Jing, Y.-Y.; Zhang, C.-F.; Zhao, J.-H. Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2009**, *13*, 2263–2278. [CrossRef]
43. Reinhart, G.; Schultz, C. Herausforderungen einer energieorientierten Produktionssteuerung. *Z. Wirtsch. Fabr.* **2014**, *109*, 29–33. [CrossRef]
44. Shakya, R.; Chauhan, P. Modelling of Risk Analysis in Production System. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* **2019**, *691*, 12087. [CrossRef]
45. Romeike, F. *Risikomanagement*; Springer Gabler: Wiesbaden, Germany, 2018; ISBN 9783658139520.
46. Klöber-Koch, J.; Braunreuther, S.; Reinhart, G. Approach For Risk Identifikation And Assessment in A Manufacturing System. *Procedia CIRP* **2018**, *72*, 683–688. [CrossRef]
47. Velasquez, M.; Hester, P. An Analysis of Multi-Criteria Decision Making Methods. *Int. J. Oper. Res.* **2013**, *10*, 56–66.
48. Pereira, J.C.; Fragoso, M.D.; Todorov, M.G. Risk Assessment using Bayesian Belief Networks and Analytic Hierarchy Process applicable to Jet Engine High Pressure Turbine Assembly. *IFAC-PapersOnLine* **2016**, *49*, 133–138. [CrossRef]
49. Saaty, T.L. How to make a decision: The analytic hierarchy process. *Eur. J. Oper. Res.* **1990**, *48*, 9–26. [CrossRef]
50. Dong, Q.; Saaty, T.L. An analytic hierarchy process model of group consensus. *J. Syst. Sci. Syst. Eng.* **2014**, *23*, 362–374. [CrossRef]
51. Emovon, I.; Norman, R.; Murphy, A. Methodology of using an integrated averaging technique and MAUT method for failure mode and effects analysis. *J. Eng. Technol.* **2016**, *7*, 140–155.
52. Siskos, Y.; Grigoroudis, E.; Matsatsinis, N. Multiple criteria decision analysis: State of the art surveys. *Mult. Criteria Decis. Anal.* **2016**, *233*, 315–362. [CrossRef]
53. Foerster, F.; Nikelowski, L. Dynamic risk consideration of predicted maintenance needs regarding economic efficiency. *Procedia CIRP* **2020**, *93*, 915–920. [CrossRef]
54. Toba, H. Segment-based approach for real-time reactive rescheduling for automatic manufacturing control. In Proceedings of the 1999 IEEE International Symposium on Semiconductor Manufacturing Conference Proceedings (Cat No.99CH36314), Santa Clara, CA, USA, 11–13 October 1999; pp. 69–72. [CrossRef]
55. MathWorks. Mixed-Integer Linear Programming Algorithms. Available online: https://de.mathworks.com/help/optim/ug/mixed-integer-linear-programming-algorithms.html?searchHighlight=branch%20and%20bound&s_tid=srchtitle#btzwtmv (accessed on 6 April 2022).
56. Bosse, M.; Frost, E.; Hazrat, M.; Rhiemeier, J.-M.; Wolff, H. Ermittlung von branchenspezifischen Potentialen zum Einsatz von erneuerbaren Energien in besonders energieintensiven Industriesektoren am Beispiel der Gießerei-Industrie. Report number UBA-FB 00. 2013. Available online: <https://www.bmu.de/forschungsbericht/ermittlung-von-branchenspezifischen-potentialen-zum-einsatz-von-erneuerbaren-energien-in-besonders-energieintensiven-industriesektoren-am-beispiel-der-giesserei-industrie> (accessed on 18 April 2022).

Risikomanagement in der energieorientierten Produktionsplanung und -steuerung

Stefan Roth und
Gunther Reinhart,
Augsburg/München

Stromkosten stellen im Rahmen der Energiewende einen zunehmend wichtigen Wettbewerbsfaktor für die Industrie dar. Der durch die energieorientierte Produktionsplanung ermittelte Strombedarf von Produktionsmaschinen und Anlagen wird im Vorfeld an den Strommärkten mit der Verpflichtung beschafft, diesen innerhalb bestimmter Toleranzen am entsprechenden Produktionstag zu verbrauchen. Treten in der laufenden Produktion Störungen auf, können die damit verbundenen Abweichungen vom eingeplanten Stromverbrauch hohe Strafkosten verursachen. Dieser Beitrag zeigt Ansatzpunkte für ein Risikomanagement im Rahmen der Produktionsplanung und -steuerung auf und beschreibt mögliche Kompensationsmaßnahmen aus der betrieblichen Praxis.*)

Energiepolitische Ziele und deren Auswirkungen auf die Industrie

Mit dem Pariser Abkommen haben sich die beteiligten 196 Staaten im Jahr 2015 darauf geeinigt, den Anstieg der weltweiten Durchschnittstemperatur bis 2050 auf 1,5 °C gegenüber dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen [1]. Deutschland hat daraufhin mit dem Klimaschutzplan 2050 die im Pariser Abkommen geforderte Klimaschutzlangfriststrategie vorgelegt. Darin ist vorgesehen, die Treibhausgasemissionen in Deutschland bis 2030 um mindestens 55 Prozent gegenüber 1990 zu senken, um einen Beitrag zur Erreichung der globalen Klimaziele zu leisten. Im Industriesektor sollen Maßnahmen ergriffen werden, um die Emissionen von 181 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalente in 2014 auf max. 143 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalente im Jahr 2030 zu begrenzen. Von zentraler Bedeutung ist weiterhin der Energiesek-

tor, mit einer Reduktion von 358 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalente in 2014 auf maximal 183 in 2030 [2]. Als Maßnahme hierzu werden fossile Kraftwerke sukzessive abgeschaltet und die erneuerbare Stromerzeugung weiter ausgebaut. Die sogenannte Kohlekommission empfiehlt einen Ausstieg aus der Kohleverstromung bis 2038 [3].

Der Umbau des Versorgungssystems hin zu einer erneuerbaren, aber witterungsabhängigen Stromerzeugung hat Auswirkungen auf die Strombeschaffung der Industrie. Bereits im Jahr 2017 bewegten sich die Preise des Day-Ahead-Markts zwischen 163 €/MWh und negativen Preisen von bis zu -83 €/MWh bei einem Mittelwert von 34 €/MWh [4]. Diese Strompreisschwankungen bieten produzierenden Unternehmen finanzielle Anreize zur Lastverschiebung. Verschiedene aktuelle Studien präsentieren mögliche Ansätze zur Flexibilisierung der Produktion [5–7] und untersuchen die Auswirkungen der industriellen Energieflexibilität auf das Energiesystem [8–10]. Mit 47 Prozent Anteil am gesamten Stromverbrauch in Deutschland im Jahr 2016 [11], bietet die Industrie ein hohes Potenzial zur Anpassung des Stromverbrauchs an eine volatile Stromerzeugung [12, 13].

Modelle der Strombeschaffung für die Industrie

Insbesondere Unternehmen mit einem hohen Stromkostenanteil unterliegen im Rahmen der Energiewende einem gestiegenen Kostendruck. Von hoher Bedeutung ist daher die Auswahl eines geeigneten Strombeschaffungsmodells. Neben der bei kleineren und mittleren Unternehmen gängigen Festpreisbeschaffung bietet die Stichtagsbeschaffung durch einen fest vereinbarten Preis den Vorteil von hoher Planungssicherheit. Dementgegen steht jedoch der Nachteil, dass die gesamte Strommenge zu einem bestimmten Stichtagspreis abgenommen werden muss. Für energieintensive Unternehmen bedeutet dieses spekulative Modell der Strombeschaffung große Einschränkungen der Risikodiversität, da nach Vertragsabschluss auf Kursschwankungen nicht mehr eingegangen werden kann. Eine Möglichkeit zur Reduzierung des Risikos von Preisschwankungen bieten die Modelle der Tranchenbeschaffung, bei denen der Strombedarf des Unternehmens nicht zu einem Einkaufszeitpunkt, sondern Teilmengen zu verschiedenen Zeitpunkten beschafft werden. Die komplexeste Form der strukturierten Strombeschaffung stellt das Portfoliomanagement dar. Unter der Vo-

*) Hinweis

Bei diesem Beitrag handelt es sich um einen von den Mitgliedern des ZWF-Advisory Board wissenschaftlich begutachteten Fachaufsatz (Peer-Review).

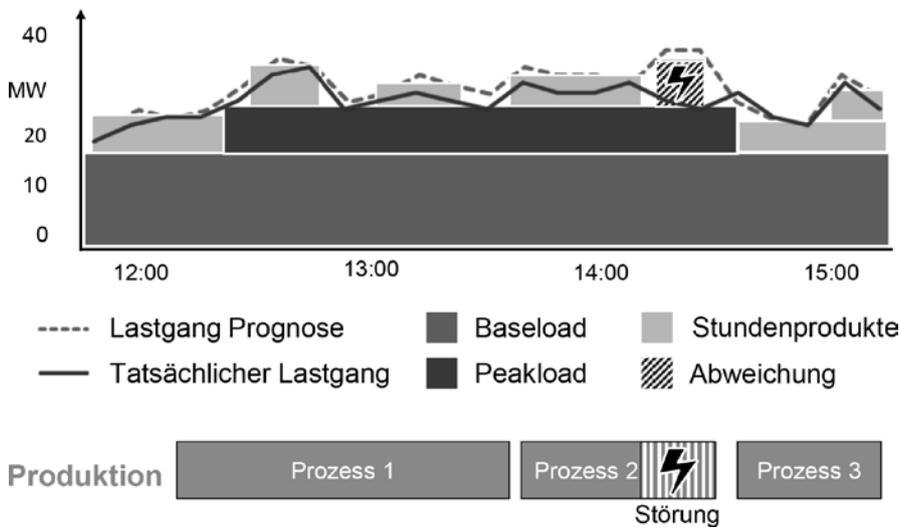


Bild 1. Industrielle Strombeschaffung mit Portfoliomangement (i. A. an [15])

raussetzung, dass das Unternehmen über einen spezialisierten Stromeinkauf mit hohem energiewirtschaftlichem Know-how verfügt, bieten sich durch das Portfoliomangement erhebliche Kostenvorteile durch die Zusammenstellung eines günstigen Mix von gehandelten Standardprodukten der Großhandelsmärkte. Je genauer der benötigte Strombedarf prognostiziert werden kann, desto zuverlässiger kann die Zusammenstellung der benötigten Standardprodukte erfolgen [14].

Industrielle Strombeschaffung unterliegt Risiken

Beim Portfoliomangement sind zwei Risikoarten zu betrachten. Das Preisrisiko durch Abweichungen der tatsächlichen Preise von der Preisprognose sowie das Mengenrisiko. Letzteres entsteht durch die Verpflichtung des Unternehmens, den im Vorfeld gekauften Strom am entsprechenden Produktionstag auch abzunehmen [15]. Neben fehlerhaften Bedarfsprognosen können diese Abweichungen auch durch Störungen im Produktionssystem am entsprechenden Produktionstag auftreten. Bild 1 zeigt ein beispielhaftes Portfolio für einen prognostizierten Lastgang für drei exemplarische Produktionsprozesse. Baseload- und Peakload-Produkte des Spotmarkts werden täglich eingekauft und durch Stundenprodukte der Börse ergänzt, um den prognostizierten Bedarf zu decken. Im Falle einer Störung am Produktionstag wird im Beispiel der Prozess 2 vorzeitig beendet. Damit entsteht eine Abweichung zwischen prognostiziertem Lastgang mit entsprechendem Stromeinkauf und dem tatsächlichen

Lastgang. Wird mit der Abweichung ein vertraglich vereinbartes Toleranzband verlassen, erheben die Stromlieferanten Aufschläge auf den vereinbarten Preis für die Über- oder Unterschreitungsmengen [16]. Die Größenordnung dieser individuellen Aufschläge lässt sich von den Ausgleichsenergiepreisen für den Einsatz von Regelleistung ableiten. Im Auswertungszeitraum von Dezember 2012 bis November 2013 lagen diese zwischen rund minus 2.500 €/MWh und 1.600 €/MWh und wiesen dabei eine starke Volatilität mit Preissprüngen von bis zu rund 2.500 €/MWh von einer Viertelstunde zur nächsten auf [17].

Produktionsplanung und -steuerung bietet Rahmen für Risikomanagement

Die Produktionsplanung und -steuerung (PPS) verfolgt langfristig die Aufgaben der Produktionsprogrammplanung und

der Produktionsbedarfsplanung. Mittel- bis kurzfristig verantwortet die PPS die Fremdbezugsplanung sowie die Eigenfertigungsplanung. [18] Letztere beinhaltet unter anderem die Losgrößen-, Termin- und Reihenfolgeplanung des Produktionssystems [19]. Die Leistungsziele der PPS sind dabei die Gewährleistung kurzer Lieferzeiten und hoher Liefertreue. Dem gegenüber stehen auf der Kostenseite Bestrebungen für geringe Kapitalbindungs- und Herstellungskosten [20]. Die energieorientierte Produktionsplanung und -steuerung verfolgt neben dem Ziel der Energieeffizienz eine zeitliche Flexibilisierung des Energiebedarfs [21]. Im Hinblick auf Stromkosten berücksichtigt die energieorientierte PPS unter anderem die Reduktion der spezifischen Jahreshöchstlast, die Nutzung von Eigenerzeugung sowie die Anpassung der Verbräuche an volatile Strompreise [14, 22].

In Bild 2 sind die Aufgaben der PPS und relevante Strommarktaspekte mit deren zeitlicher Einordnung innerhalb des Produktionstags mit Vortag dargestellt. Aufgrund des Planungshorizonts von Tagen bis Stunden werden von der operativen Produktionsplanung insbesondere die Preise des Day-Ahead-Markts berücksichtigt [6]. Spätestens am Vortag bis 12:00 Uhr müssen die Gebote zu den Strommengen für den Folgetag feststehen. Verschiedene Energieflexibilitätsmaßnahmen, wie z. B. die Änderung der Auftragsreihenfolge, stehen der Produktionsplanung zur Verfügung, um den geplanten Produktionslastgang auf die Preisprognosen des Day-Ahead Markts anzupassen [23]. Am entsprechenden Produktionstag besteht dann die Möglichkeit, Überschussmengen und Unterdeckungen durch Intraday-Handel auszugleichen [24], oder im Rahmen der Produktionssteuerung kurz-



Bild 2. Identifikation und Kompensation von Produktionsrisiken im Rahmen der PPS

fristige Maßnahmen zur Anpassung des Strombedarfs vorzunehmen. Damit bietet die energieorientierte PPS den geeigneten Rahmen für die Identifikation von Produktionsrisiken vor deren Eintreten im laufenden Betrieb und der Planung von geeigneten Kompensationsmaßnahmen zur Vermeidung von zusätzlichen Stromkosten.

Stand der Forschung

Auf dem Gebiet der energieflexiblen Produktion finden sich verschiedene Arbeiten, die sich mit der Bewertung von Energieflexibilitätsmaßnahmen befassen [25, 26]. Simon stellt einen Ansatz vor, bei dem der grundlegende Aufbau eines energieflexiblen Produktionssystem hinsichtlich Risiken untersucht werden kann [27]. Auf dem Gebiet der operativen Planung wurden Methoden zur energieorientierten Auftragsplanung [21], Planung der Maschinenbelegung unter Berücksichtigung von Energiebeschaffungsoptionen [28] sowie integrierte Ansätze zur Planung von Produktionskapazitäten und Energiespeichereinsatz [29] vorgestellt. Im Rahmen der Produktionssteuerung finden sich Arbeiten zur Anpassung des Strombedarfs im laufenden Betrieb unter Berücksichtigung des Stromangebots [30] und zur kostenorientierten energieflexiblen Produktionssteuerung [31]. Schultz stellt ein situatives Lastmanagement zur Vermeidung von Abweichungen vom Plan-Lastgang vor [32].

Die Forschungsarbeiten zu Risiken im Produktionsumfeld haben verschiedene Ansätze zur langfristigen Identifikation und Kompensation hervorgebracht. König entwickelte ein Vorgehen zur modellbasierten Analyse von Prozesselementen [33]. Gebhard integriert Ansätze der robusten Planung in ein hierarchisches Planungssystem [34]. Im Kontext kurzfristiger Erkennung und Kompensation von Risiken finden sich optimierungsbasierte Methoden zur Produktionsplanung unter Berücksichtigung von Risiken durch minderwertige Rohstoffe [35] sowie datengesteuerte Risikomanagementansätze zur Quantifizierung in Echtzeit [36]. Klöber-Koch entwickelte ein System zur Produktionsplanung unter Berücksichtigung der Risikopräferenz [37]. Die genannten Ansätze haben gemein, dass logistische Zielgrößen im Fokus des Risikomanagements liegen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass in den bestehenden Ansätzen der energieorientierten Produktionsplanung

Bild 3. Mögliche Maßnahmen zur Kompensation, angeordnet nach deren Auswirkungen auf den Durchsatz (i. A. an [32, 40])

Auswirkung auf Durchsatz

Prozesse 		Peripherie   		
1. Ordn.	2. Ordn.	1. Ordn.	2. Ordn.	3. Ordn.
Fertigung Montage (Engpässe)	Fertigung Montage (entkoppelt)	z.B. Hilfsstoff-bereitstellung u. -transport	z.B. Druckluft-erzeug,	z.B. Klimatisier. Beleuchtung Stromerz. Batterien

keine strukturierte Risikobetrachtung mit entsprechenden Kompensationsmaßnahmen integriert wurde. Die existierenden Methoden des Risikomanagements im Produktionsumfeld wurden bisher nicht auf die energieorientierte Produktionsplanung und -steuerung angewendet.

Produktionsrisiken strukturiert betrachten

Risiken im Produktionsumfeld lassen sich übergeordnet in Beschaffungs-, Produktions- und Marktrisiken kategorisieren. Im operativen Umfeld sind dabei Produktionsrisiken von zentraler Bedeutung. [33, 38] Während die Betrachtung von Beschaffungs- und Marktrisiken vorrangig den Energieeinkauf betrifft, ist die Reduktion der Produktionsrisiken eine wesentliche Aufgabe der Produktionsverantwortlichen, da der Lastgang des Unternehmens neben Erzeugungsanlagen und der Fabrikinfrastruktur im Wesentlichen durch den Stromverbrauch der Produktionsanlagen beeinflusst wird.

Grundsätzlich wird nach ISO 31000 unter Risiko sowohl unerwartete Ereignisse sowie deren Folgen in Form von negativen oder positiven Abweichungen von einem festgelegten Erwartungswert verstanden [39]. Nach König sind Produktionsrisiken alle Risiken, die innerhalb des betrachteten Produktionssystems entstehen bzw. direkt von Elementen innerhalb des Produktionssystems ausgelöst werden. Diese lassen sich weiter untergliedern in Personal-, Anlagen- und Materialrisiken [33]. Beispiele aus der betrieblichen Praxis der energieintensiven Industrie sind hierzu verzögerte Transformatorenwechsel durch fehlendes Personal in der Graphitherstellung, Anlagenstopps durch Papierbahnabrisse in der Papierbranche sowie verspätete Abgusszeitpunkte durch fehlerhafte Formen im Gießereibetrieb. Diese unerwarteten Änderungen in der Fahrweise der Anlagen bewirkt eine Abweichung von der geplanten und beschafften Strommenge.

Mögliche Maßnahmen zur Kompensation in energieflexiblen Produktionssystemen

Zur Kompensation von Abweichungen vom geplanten Lastverlauf bietet sich im industriellen Umfeld die Nutzung von flexiblen Produktionsprozessen und energieflexible Anlagen der Peripherie an. Zur Kategorisierung dieser Maßnahmen nach [32, 40] gibt Bild 3 einen Überblick. Bei den flexiblen Produktionsprozessen werden dabei jene mit direkter Einwirkung auf den Durchsatz (1. Ordnung) von entkoppelten Prozessen mit Puffern unterschieden (2. Ordnung). Die Peripherie ist in drei Ordnungen, mit abnehmender Auswirkung auf den Durchsatz, unterteilt. Typische Beispiele der Peripherie, wie die Bereitstellung von Hilfsstoffen (1. Ordnung) und die Erzeugung von Druckluft (2. Ordnung), haben abgesehen von einer Entkopplung durch Lager bzw. Speicher geringe Auswirkungen auf den Durchsatz.

Die fast vollständig entkoppelten Technologien der 3. Ordnung, wozu die Eigenerzeugung sowie Stromspeicher gehören, finden in den Unternehmen zunehmend Verbreitung (Bild 4). Nach einer Studie des Deutschen Industrie- und Handelskammertags verfügten im Jahr 2018 bereits 22 Prozent der befragten Unternehmen über Eigenerzeugungsanlagen. Weitere 21 Prozent planen eine Anlage zu errichten, oder arbeiten bereits an Projekten zum Aufbau von Eigenerzeugungsanlagen. Stromspeicher nutzen drei Prozent der Unternehmen, weitere 16 Prozent errichten Anlagen oder Planen dies zu tun. Neben stationären Batteriespeichern könnten zukünftig auch die Speicher von Elektrofahrzeugen an der Ladeinfrastruktur des Unternehmens über gezielte Lade- und Entladevorgänge genutzt werden [41]. 17 Prozent der Unternehmen besitzen bereits Elektrofahrzeuge im Fuhrpark, mit zunehmender Tendenz [42]. Um Batteriespeicher für die

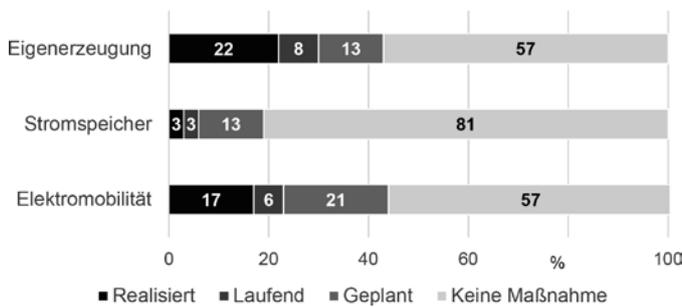


Bild 4. Maßnahmen befragter Unternehmen in 2018 [42]

Risikokompensation nutzen zu können, ist es erforderlich, den Ladezustand so vorzuhalten, dass zum Zeitpunkt möglicher Störungen eine Be- bzw. Entladung möglich ist. Dazu empfiehlt sich die integrierte Betrachtung von Produktionsprozessen und Speichernutzung an, um ein Kostenoptimum zu erreichen [43].

Um zu gewährleisten, dass allen potenziellen Störungen die geeigneten Kompensationsmaßnahmen zugeordnet werden können, empfiehlt es sich, den gesamten Produktionsplanungsprozess um ein strukturiertes Risikomanagement zu ergänzen. So werden beispielsweise bei der Festlegung von Losgrößen mögliche Eilaufträge berücksichtigt, bei der Kapazitätsplanung Maschinenausfälle betrachtet und bei der Reihenfolgeplanung das Auftreten fehlerhafter Halbzeuge untersucht. Hier empfiehlt sich, ein Vorgehen nach der Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse (Prozess-FMEA), um Auftretswahrscheinlichkeit, Auswirkungen und Entdeckungswahrscheinlichkeiten strukturiert zu analysieren. Zur Untersuchung komplexer Wechselwirkungen zwischen Störungen und Kompensationsmaßnahmen bieten sich Materialflusssimulationen an. Da hierzu sowohl produktionsbezogenes Fachwissen wie auch methodische Kenntnisse vorausgesetzt sind, sollten interdisziplinäre Teams aus Produktions- und Prozessverantwortlichen gebildet werden. Die bedarfsorientierte Einbindung von Experten weiterer Fachabteilungen, wie z.B. Einkauf und Vertrieb, gewährleistet die Identifikation neuer Risiken. Die zeitlichen Intervalle zur Durchführung der Risikobetrachtung sind abhängig von den individuellen Fertigungsverfahren, den Strombeschaffungsmodellen und dem Risikopotenzial des Unternehmens. Das Ziel des Risikomanagements im Rahmen der energieorientierten Produktionsplanung ist es, der Produktionssteuerung zusätzlich zum Produktionsplan einen Kompensationsplan mit Handlungsempfehlungen für mögliche Störungen zu übergeben.

Zusammenfassung und Ausblick

Energieintensive Unternehmen, aber auch produzierenden Unternehmen mit eigenerzeugungsanlagen und einem ausgeprägten Energiemanagement, können durch die strukturierte Betrachtung von Risiken im Rahmen der Produktionsplanung zusätzliche Stromkosten vermeiden. Werden potenzielle Störungen und Fehler im Produktionsablauf bereits im Rahmen der Produktionsplanung identifiziert und bewertet, verfügt die Produktionssteuerung über Informationen zu Eintrittswahrscheinlichkeit und Auswirkungen. Zusätzlich können geeignete Kompensationsmaßnahmen geplant werden, die im Eintrittsfall einer Abweichung vom geplanten Lastverlauf entgegenwirken. So kann vermieden werden, dass im Fall von Störungen und Fehlern situative Entscheidungen unter Zeitdruck getroffen werden müssen. Umfassende Kompensationsmaßnahmen werden nicht unmittelbar bei kleineren Störungen genutzt, sondern können zugunsten von Risiken mit hoher Eintrittswahrscheinlichkeit und großen Auswirkungen auf den Lastgang vorgehalten werden. Gelingt es somit, die Bereitschaft der Unternehmen für die weitere Flexibilisierung ihres Strombedarfs zu erhöhen, wird die Integration von volatilen Erzeugungsanlagen in das Energiesystem unterstützt und damit ein Beitrag für die Energiewende geleistet.

Literatur

- United Nations: Adoption of the Paris Agreement. 2015
- Deutscher Bundestag: Klimaschutzplan 2050 - Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung: Unterrichtung durch die Bundesregierung. Deutscher Bundestag, Berlin, 2016
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: Kommission „Wachstum, Strukturwandel und Beschäftigung“: Abschlussbericht. Berlin, 2019
- Bundesnetzagentur: SMARD Strommarktdaten. Online unter <https://www.smard.de/home> [Zugriff am 20.12.2018]

- Bank, L.; Rösch, M.; Unterberger, E.; Roth, S.; Rohrer, A.; Köberlein, J.; Braunreuther, S.; Schilp, J.: Comparison of Simulation-based and Optimization-based Energy Flexible Production Planning. *Procedia CIRP* 81 (2019), S. 294–299
DOI: 10.1016/j.procir.2019.03.051
- Keller, F.; Schultz, C.; Braunreuther, S.; Reinhart, G.: Enabling Energy-Flexibility of Manufacturing Systems through New Approaches within Production Planning and Control. In: *Proceedings of the 49th CIRP Conference on Manufacturing Systems 2016*
DOI: 10.1016/j.procir.2016.11.130
- Unterberger, E.; Glasschröder, J.; Reinhart, G.: A Systems Engineering Based Method to Increase Energy Flexibility. In: *Proceedings of the 50th CIRP Conference on Manufacturing Systems 2017*
DOI: 10.1016/j.procir.2017.03.357
- Egert, R.; Tundis, A.; Roth, S.; Mühlhäuser, M.: A Service Quality Indicator for Apriori Assessment and Comparison of Cellular Energy Grids. In: *Proceedings of the 10th International Conference in Sustainability on Energy and Buildings (SEB'18)*. Springer Nature Switzerland, 2018, S. 322–332
DOI: 10.1007/978-3-030-04293-6_32
- Roth, S.; Thimmel, M.; Fischer, J.; Schöpf, M.; Unterberger, E.; Braunreuther, S.; Buhl, H. U.; Reinhart, G.: Simulation-based Analysis of Energy Flexible Factories in a Regional Energy Supply System. In: *Proceedings of the 16th Global Conference on Sustainable Manufacturing*. *Procedia Manufacturing* 33 (2019), S. 75–82
DOI: 10.1016/j.promfg.2019.04.011
- Unterberger, E.; Buhl, H. U.; Häfner, L.; Keller, F.; Keller, R.; Ober, S.; Paulick-Thiel, C.; Reinhart, G.; Schöpf, M.; Simon, P.: The Regional and Social Impact of Energy Flexible Factories. *Procedia Manufacturing* 21 (2018), S. 468–475
DOI: 10.1016/j.promfg.2018.02.146
- Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V.: *Energieverbrauch in Deutschland im Jahr 2016*. Berlin, Köln 2017
- Lund, P.; Lindgren, J.; Mikkola, J.; Salpakari, J.: Review of Energy System Flexibility Measures to Enable High Levels of Variable Renewable Electricity. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 45 (2015) 45, S. 785–807
DOI: 10.1016/j.rser.2015.01.057
- Müller, T.; Möst, D.: Demand Response Potential: Available when Needed? *Energy Policy* 115 (2018), S. 181–198
DOI: 10.1016/j.enpol.2017.12.025
- Schumacher, I.; Würfel, P.: *Strategien zur Strombeschaffung in Unternehmen: Energieeinkauf optimieren, Kosten senken*. Springer Fachmedien, Wiesbaden 2015
DOI: 10.1007/978-3-658-07422-7
- Konstantin, P.: *Praxisbuch Energiewirtschaft: Energieumwandlung, -transport und -beschaffung im liberalisierten Markt*. Springer-Vieweg-Verlag, Wiesbaden 2013
- Matzen, F.; Tesch, R. (Hrsg.): *Industrielle Energiestrategie: Praxishandbuch für Entscheider des produzierenden Gewerbes*.

- Springer-Gabler-Verlag, Wiesbaden 2017
DOI: 10.1007/978-3-658-07606-1
17. Agora Energiewende: Negative Strompreise: Ursachen und Wirkungen – Eine Analyse der aktuellen Entwicklungen – und ein Vorschlag für ein Flexibilitätsgesetz. Energy Brainpool GmbH & Co. KG, Berlin 2014
 18. Schuh, G.; Stich, V.: Produktionsplanung und -steuerung 1: Grundlagen der PPS. 4. überarbeitete Aufl., Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 2012
 19. Luczak, H.; Eversheim, W. (Hrsg.): Produktionsplanung und -steuerung: Grundlagen, Gestaltung und Konzepte (VDI-Buch). Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 1999
DOI: 10.1007/978-3-662-09472-3
 20. Wiendahl, H.-P.: Betriebsorganisation für Ingenieure. 7., aktualisierte Aufl., Carl Hanser Verlag, München, Wien 2010
DOI: 10.3139/9783446422889
 21. Keller, F.K.: Methodik zur energiebezugsorientierten Auftragsplanung. Dissertation, TU München, 2018
 22. Müller, E.; Engelmann, J.; Löffler, T.; Strauch, J.: Energieeffiziente Fabriken planen und betreiben. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 2009
DOI: 10.1007/978-3-540-89644-9
 23. VDI – Verein Deutscher Ingenieure e. V.: VDI 5207 Energieflexible Fabrik, Blatt 1 Grundlagen. VDI-Verlag, Düsseldorf 2019
 24. ewi Energy Research & Scenarios gGmbH: Ausgangsbedingungen für die Vermarktung von Nachfrageflexibilität: Status-quo-Analyse und Metastudie. Bayreuth, 2017
 25. Graßl, M.: Bewertung der Energieflexibilität in der Produktion. Dissertation, TU München, 2015
 26. Simon, P.; Roltsch, F.; Glasschröder, J.; Reinhart, G.: Approach for a Potential Analysis of Energy Flexible Production Systems. In: Proceedings of the 50th CIRP Conference on Manufacturing Systems. Procedia CIRP 63 (2017), S. 580–585
DOI: 10.1016/j.procir.2017.03.153
 27. Simon, P.; Zeiträg, Y.; Glasschroeder, J.; Tomothy, G.; Reinhart, G.: Approach for a Risk Analysis of Energy Flexible Production Systems. Procedia CIRP 72 (2018), S. 677–682
DOI: 10.1016/j.procir.2018.03.073
 28. Agha, M.H.: Integrated Management of Energy and Production: Scheduling of Batch Process and Combined Heat & Power (CHP) Plant. Doctorat de L'Universite de Toulouse, 2009
 29. Moon, J.-Y.; Park, J.: Smart Production Scheduling with Time-dependent and Machine-dependent Electricity Cost by Considering Distributed Energy Resources and Energy Storage. International Journal of Product Research 52 (2014) 13, S. 3922–3939
DOI: 10.1080/00207543.2013.860251
 30. Beier, J.; Neef, B.; Thiede, S.; Herrmann, C.: Integrating On-site Renewable Electricity Generation into a Manufacturing System with Intermittent Battery Storage form Electric Vehicles. In: Proceedings of the 23rd CIRP Conference on Life Cycle Engineering. 2016
DOI: 10.1016/j.procir.2016.04.057
 31. Rösch, M.; Berger, C.; Braunreuther, S.; Reinhart, G.: Cost-model for Energy-oriented Production Control. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM). Dezember 2018
DOI: 10.1109/IEEM.2018.8607305
 32. Schultz, C.: System zur energieorientierten Produktionssteuerung in der auftragsbezogenen Fertigung. Dissertation, 2018
 33. König, R.: Management betrieblicher Risiken bei produzierenden Unternehmen. Dissertation, RWTH Aachen, 2008
 34. Gebhard, M.: Hierarchische Produktionsplanung bei Unsicherheit. Gabler Verlag, Wiesbaden, Online-Datei, 2009
DOI: 10.1007/978-3-8349-8227-8
 35. Wang, X.; Li, D.; O'brien, C.; Li, Y.: A Production Planning Model to Reduce Risk and Improve Operations Management. International Journal of Production Economics 124 (2010) 2, S. 463–474
DOI: 10.1016/j.ijpe.2009.12.009
 36. Niesen, T.; Houy, C.; Fettke, P.; Loos, P.: Towards an Integrative Big Data Analysis Framework for Data-Driven Risk Management in Industry 4.0. In: Proceedings of the 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS) 2018, S. 5065–5074
 37. Klöber-Koch, J.; Braunreuther, S.; Reinhart, G.: Approach for Risk Identifikation and Assessment in a Manufacturing System. Procedia CIRP 72 (2018), S. 683–688
DOI: 10.1016/j.procir.2018.03.218
 38. Härterich, S.: Risk Management von industriellen Produktions- und Produktrisiken. Zugl.: Dissertation Universität Mannheim, 1987; VVV Verlag, Karlsruhe 1987
 39. DIN ISO 31000:2018-10: Risikomanagement – Grundsätze und Leitlinien. Beuth Verlag, Berlin 2018
 40. Haag, H.: Eine Methodik zur modellbasierten Planung und Bewertung der Energieeffizienz in der Produktion. Dissertation, Universität Stuttgart, 2013
 41. Roth, S.; Klement, T.; Braunreuther, S.; Reinhart, G.: Vehicle-to-Factory: Eine Potenzialanalyse zur Nutzung der Speicher von Elektromobilen im industriellen Umfeld. ZWF 113 (2018) 9, S. 565–570
DOI: 10.3139/104.111962
 42. DIHK - Deutscher Industrie- und Handelskammertag: Akzeptanz in der Wirtschaft schwindet: IHK-Energiewende-Barometer 2018. DIHK, Berlin 2018
 43. Roth, S.; Stumpe, L.; Schmiegel, B.; Braunreuther, S.; Schilp, J.: An Optimization-based Approach for the Planning of Energy Flexible Production Processes with Integrated Energy Storage Scheduling (to appear). In: Proceedings of the 13th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering, 2019

Die Autoren dieses Beitrags

Stefan Roth absolvierte 2007 die Berufsausbildung zum Elektroniker für Energie- und Gebäudetechnik bei der Überlandwerk Krumbach GmbH. Er studierte von 2009 bis 2013 Wirtschaftsingenieurwesen mit Schwerpunkt Energietechnik an den Hochschulen in Ulm und Neu-Ulm. Im September 2014 schloss er sein Studium an der Hochschule für Technik und Wirtschaft des Saarlandes mit einem Master of Science ab. Während des Studiums sammelte er Praxiserfahrung bei einer Management- und Technologieberatungsgesellschaft in Berlin und an einem Institut der Universidad Autónoma de Guadalajara in Mexiko. Von 2014 bis 2017 arbeitete er als Researcher bei der Stadtwerke Saarlouis GmbH in verschiedenen Innovations- und Forschungsprojekten. Seit September 2017 ist er beim Fraunhofer IGCV in Augsburg u. a. im Rahmen des Kopernikus-Projekts „SynErgie“ tätig. Daneben ist er Mitglied im VDI Fachausschuss Energieflexible Fabriken (GPL FB2 FA 208.1). Zu seinen Forschungsfeldern gehören die energieorientierte Produktionsplanung und -steuerung sowie das industrielle Energiemanagement.

Professor Dr.-Ing. Gunther Reinhart ist Ordinarius für Betriebswissenschaften und Montagetechnik an der TU München. Er studierte bis 1982 Maschinenbau mit dem Schwerpunkt Konstruktion & Entwicklung und schloss 1987 die Promotion am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der TU München bei Prof. Dr.-Ing. J. Milberg ab. Von 1988 bis 1993 war er leitender Angestellter bei der BMW AG in München, erst zuständig für die Entwicklung von Füge- und Handhabungstechnologien, später verantwortlich für die Münchner Karossen-Lackiererei. 1993 wurde Prof. Reinhart auf den Lehrstuhl für Betriebswissenschaften und Montagetechnik an der TU München und in die Leitung des *iwb* berufen. Seit 2016 ist Professor Reinhart Institutsleiter des Fraunhofer IGCV in Augsburg.

Summary

Risk Management in Energy-oriented Production Planning and Control. Due to the energy turnaround, electricity costs are an increasingly important competitive factor for the industry. The electricity demand of production machines and plants determined by energy-oriented production planning is procured in advance, with the obligation to consume within certain tolerances on the day of production. If disruptions occur in the current production, the deviations from the planned electricity consumption can cause high penalties. This article shows starting points for risk management in energy-oriented production planning and control and describes possible compensation measures from the operational practice.

Bibliography

DOI 10.3139/104.112218

ZWF 114 (2019) 12; page 823–827

© Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG

ISSN 0947-0085