



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN

Vienna University of Technology

## **Diplomarbeit**

# **Die Auswirkungen der dezentralen Nutzung erneuerbarer Energien auf die Produktionsplanung und -steuerung – eine Simulationsstudie**

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines

## **Diplom-Ingenieurs**

unter der Leitung von

**Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl. Wirt.-Ing. Prof. eh. Dr. h.c. Wilfried Sihn**

(E330 Institut für Managementwissenschaften, Bereich: Betriebstechnik und Systemplanung)

**Univ. Ass. Dipl.-Ing. Dr. rer. soc. oec. Selim Erol**

(E330 Institut für Managementwissenschaften, Bereich: Betriebstechnik und Systemplanung)

eingereicht an der Technischen Universität Wien

**Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften**

von

**Dominik Brodschelm**

Matrikelnummer: 01527370

Fischervorstadt 7, 84524 Neuötting, Deutschland

Wien, im September 2018

---

Dominik Brodschelm



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN  
Vienna University of Technology

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

## **Diplomarbeit**

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Ich erkläre weiters Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbstständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, genannt habe.

Weiters erkläre ich, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch Ausland (einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Wien, im September 2018

---

Dominik Brodschelm

## **Danksagung**

Herrn Dr. Selim Erol danke ich hiermit sehr für die geduldige Betreuung und Verbesserung dieser Arbeit. Seine wertvollen Hinweise und Anregungen haben mich die entscheidenden Schritte vorankommen lassen.

Spezieller Dank geht an meine Eltern, für Ihre bedingungslose Unterstützung bei der Erreichung meiner Ziele. Ohne ihr Verständnis und ihren Beitrag wäre mein Studium nicht möglich gewesen.

## Kurzfassung

Für produzierende Unternehmen entsteht sowohl angesichts schwindender fossiler Energieträger als auch bedenklicher Tendenzen im Bereich der globalen Erwärmung die Notwendigkeit, sich mit alternativen Konzepten der Energieversorgung zu befassen. Parallel zeigt sich, dass auch das gesellschaftliche Verlangen nach umweltbewusster Herstellung verschiedener Produkte deutlich zunimmt. Die dezentrale Nutzung erneuerbarer Energieträger ist im Rahmen dieser Problemstellungen ein vielversprechendes Konzept und birgt dabei enormes Potenzial bei der intelligenten Verbindung der Produktionsplanung und -steuerung (PPS) mit den Systemen des Energiemanagements (EM). Bisher publizierte Ansätze lassen jedoch einen Fokus auf explizit dezentrale Lösungsansätze vermissen und bieten den Unternehmen nur wenig Aufschluss über effektive Handlungsmöglichkeiten.

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit den Auswirkungen der dezentralen Nutzung erneuerbarer Energieerzeugungsanlagen auf die PPS und verdeutlicht deren Zusammenspiel anhand der Entwicklung eines simulationsbasierten Planungswerkzeugs. Erstes Ziel der Arbeit war es, neben den Anforderungen auch bereits existierende Lösungsansätze für die vereinte Implementierung von Energiemanagement- und PPS-Systemen mittels systematischer Literaturrecherche darzustellen. Im Anschluss daran wurde mit der Entwicklung eines Simulationsmodells und einer beispielhaften Fallstudie darauf abgezielt, die effektive Gestaltung von kombinierten EM/PPS-Systeme zu unterstützen.

Als zentrale Erkenntnis der Arbeit ist festzuhalten, dass durch energieorientierte, flexible Produktionspläne auch auf Grundlage von dezentralen, erneuerbaren Energieerzeugungsanlagen konkurrenzfähige Standards hinsichtlich logistischer und ökonomischer Zielgrößen erfüllt werden können, während gleichzeitig ein Beitrag zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen geleistet wird.

**Schlagworte:** *Produktionsplanung und -steuerung, Dezentrale Energieerzeugung, Hybride Simulation, Energiemanagement, Erneuerbare Energie, Nachhaltige Fertigung*

## Abstract

Considering ever dwindling fossil fuel resources as well as alarming tendencies in global warming, companies face the increasing necessity to address alternative concepts of energy supply. Simultaneously, social and political pressure towards sustainable manufacturing grows continuously. Regarding these developments, decentralised (on-site) electricity generation from variable renewable energy sources, such as solar and wind resources, represents a promising alternative approach. Implemented alongside a combination of production planning and control (PPC) and energy management (EM) holds further potential. Previous publications however, lack an explicit focus on decentralised solutions and provide insufficient information about possible options of action.

This research examines the effects of decentralised use of renewable power plants on PPC and explores their interaction by the development of a simulation-based planning tool. The first objective was to outline specific requirements for the joint implementation of EM/PPC-systems, which was followed by a description of existing solutions in this field, conducted by means of a systematic literature search. Subsequently, the second objective was to develop a practical simulation model which, applied to a specific case study, would support the further design of combined EM/PPC-systems.

The key findings of this study suggest that based on flexible, energy-oriented production plans, companies can still meet competitive standards with respect to logistic and economic targets by exclusively relying on renewable on-site generation, whilst considerably reducing of CO<sub>2</sub>-emissions.

**Keywords:** *production planning and control, decentral energy generation, on-site generation, hybrid simulation, energy management, renewable energy, sustainable manufacturing*

# Inhaltsverzeichnis

|                                                                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Inhaltsverzeichnis                                                                                                            | 4  |
| 1 Einleitung                                                                                                                  | 6  |
| 1.1 Aktualität und Relevanz des Themas .....                                                                                  | 6  |
| 1.2 Zentrale Forschungsfragen und Ziele.....                                                                                  | 8  |
| 1.3 Vorgehensweise und Methodik .....                                                                                         | 10 |
| 2 Theoretische Grundlagen                                                                                                     | 11 |
| 2.1 Dezentrale, erneuerbare Energieerzeugung in Industrie und Gewerbe.....                                                    | 11 |
| 2.1.1 Definition und Charakterisierung dezentraler, erneuerbarer<br>Energieerzeugung.....                                     | 11 |
| 2.1.2 Grundlagen der Photovoltaik.....                                                                                        | 12 |
| 2.1.3 Grundlagen der Windkraft.....                                                                                           | 16 |
| 2.1.4 Relevanz für Industrie und Gewerbe.....                                                                                 | 22 |
| 2.2 Dezentral relevante Stromspeicher-Technologien.....                                                                       | 24 |
| 2.3 Energiemanagement in der produzierenden Industrie.....                                                                    | 27 |
| 2.4 Energieökonomisch und -ökologisch relevante Bereiche der<br>Produktionsplanung und -steuerung.....                        | 29 |
| 2.5 Eingrenzung des Produktionscharakters .....                                                                               | 31 |
| 3 State-of-the-Art Analyse und Simulation                                                                                     | 34 |
| 3.1 Hintergrund zur Vorgehensweise .....                                                                                      | 34 |
| 3.2 Anforderungen an kombiniertes EM/PPS-Systeme auf Basis erneuerbarer,<br>dezentraler Energieerzeugung .....                | 36 |
| 3.3 Lösungsansätze und -konzepte für kombinierte EM/PPS-Systeme auf Basis<br>erneuerbarer, dezentraler Energieerzeugung ..... | 46 |
| 3.3.1 Ökonomisch orientierte Optimierungskonzepte .....                                                                       | 46 |
| 3.3.2 Ökologische Aspekte der Optimierungskonzepte .....                                                                      | 59 |
| 3.4 Simulationsmodell als Planungstool .....                                                                                  | 61 |
| 3.4.1 Ausgangssituation.....                                                                                                  | 61 |

---

|       |                               |     |
|-------|-------------------------------|-----|
| 3.4.2 | Vorgehensweise .....          | 64  |
| 3.4.3 | Ergebnisse .....              | 80  |
| 4     | Schlussfolgerung und Ausblick | 87  |
| 5     | Anhang                        | 90  |
| 6     | Literaturverzeichnis          | 99  |
| 7     | Abbildungsverzeichnis         | 105 |
| 8     | Tabellenverzeichnis           | 108 |
| 9     | Abkürzungsverzeichnis         | 109 |

# 1 Einleitung

## 1.1 Aktualität und Relevanz des Themas

Der weltweite Ausstoß an Treibhausgasen erreichte im Jahre 2010 mit 49,5 Milliarden Tonnen CO<sub>2</sub> ein zuvor nie dagewesenes Maximum. 28,6% dieser globalen Emissionen wurden durch den industriellen Sektor verursacht (vgl. Beier, Thiede, & Herrmann, 2017, S. 1). In Reaktion auf diese alarmierenden Zahlen legten die 195 Mitgliedsstaaten der Klimakonvention UNFCCC 2015 im Pariser Klimaabkommen fest, wie dem anthropogenen Klimawandel in Zukunft entgegengewirkt werden kann (vgl. Dröge, 2015, S. 5). Im Oktober 2016 einigte sich die Europäische Union dann darauf, den Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur langfristig möglichst unter 2 °C im Vergleich zu vorindustriellen Werten zu halten. Zusätzlich wurde Übereinkunft darüber getroffen, die Treibhausgasemissionen bis 2030 um mindestens 40% gegenüber dem Jahre 1990 zu senken (vgl. Liobikienė & Butkus, 2017, S. 1).

Wie bereits kurz erwähnt, wird über ein Viertel der weltweit emittierten Treibhausgase durch industrielle Tätigkeiten herbeigeführt. Demnach ist es offensichtlich, dass in Zukunft nicht nur die Politik gefragt ist gesetzliche Maßstäbe hin zu einer klimafreundlicheren Gesellschaft zu setzen, sondern auch die Unternehmen selbst in der Pflicht stehen, ihren Beitrag zum Gelingen der im Pariser Abkommen vereinbarten Zielen zu leisten. Studien dazu belegen, dass der industrielle Sektor das Potenzial hat, seine Treibhausgasemissionen bis 2050 um 80-95% zu senken und dabei gleichzeitig rund 20% des gesamten Energiebedarfs einzusparen vermag (vgl. Bougain, Gerhard, Nigischer, & Uğurlu, 2015, S. 1).

Wird nun bedacht, dass momentan 65% der globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen durch das Verbrennen fossiler Rohstoffe entstehen, liegt nahe, die sogenannte Dekarbonisierung unserer Energieversorgung zum zentralen Bestandteil zukünftig notwendiger Veränderungen zu machen. Vor allem das Nutzen der Sonnen- und Windenergie mittels Photovoltaik- und Windkraftanlagen zählt in diesem Zusammenhang zu den emissionsneutralen Schlüsseltechnologien. Aufgrund ihres modularen Aufbaus können diese nahezu überall implementiert werden und vor Ort für die dezentrale Erzeugung von Elektrizität sorgen (vgl. Lacal Arantegui & Jäger-Waldau, 2018, S. 1).

Unterdessen entsteht für produzierende Unternehmen sowohl durch den in der Gesellschaft wachsenden Stellenwert der nachhaltigen Herstellung verschiedener Produkte als auch den immer stärker fluktuierenden Strompreis die Notwendigkeit, sich mit alternativen Konzepten der Energieversorgung zu befassen. Gerade durch die lokale Erzeugung und Speicherung von Elektrizität aus erneuerbaren Quellen kann auf den spezifischen Energiebedarf eines Unternehmens effizient und flexibel reagiert werden ohne gleichzeitig den Umweltgedanken zu vernachlässigen (vgl. Ghadimi, Kara, & Kornfeld, 2015, S. 1). Gleichzeitig geht dieser innovative Wandel hin zu alternativen und flexiblen Energiequellen einher mit dem Erfordernis auch gewisse Kernbereiche des Produktionsmanagements, wie z.B. die Produktionsprogramm- und Fertigungsplanung, an die veränderten Energieversorgungsmuster anzupassen (vgl. Schuh & Stich, 2012, S. 26).

In der Vergangenheit fokussierten sich Unternehmen vorherrschend auf Produktionsfaktoren wie Arbeitskraft, Maschinenkapazität und Materialverfügbarkeit, um sowohl Qualitäts- als auch Kostenziele zu erreichen. Aufgrund der erheblichen Veränderungen am Energiemarkt entwickelt sich nun die vormals nahezu unendlich verfügbare Ressource Energie zu einem essentiellen Produktionsfaktor mit großer Auswirkung auf die Ziele der Unternehmen. Speziell die Produktionsplanung und -steuerung (PPS), die für die Organisation und Abwicklung der Produktionsaufträge mit den zur Verfügung stehenden Ressourcen zuständig ist, begegnet durch das individuelle Energieverbrauchsverhalten einer Fabrik großen Herausforderungen aber auch Chancen (vgl. Keller & Reinhart, 2016, S. 1). Zentraler Gesichtspunkt dieser Herausforderungen ist die Volatilität der erneuerbaren Energien. Mit anderen Worten sorgt der dynamische Charakter des sauberen Energieangebots, präziser ausgedrückt die zeitlich stark fluktuierende Verfügbarkeit von Sonneneinstrahlung und Wind, für verstärkten Optimierungsbedarf in diversen Bereichen des Produktionsmanagements der Unternehmen. Teil der angestrebten ökonomischen und ökologischen Energieoptimierung sind dabei sowohl Planungsfunktionen wie Kapazitätsermittlung, Auftragsterminierung und Losgrößenrechnung als auch Steuerungsfunktionen wie Maschinenbelegung, Auftragsfreigabe und Ressourcenüberwachung (vgl. Schuh & Stich, 2012, S. 26).

Um in Unternehmen ein stabiles und kosteneffizientes Energieversorgungssystem garantieren zu können, muss die optimale Balance zwischen Energieangebot und -nachfrage gefunden werden (vgl. Weckmann, Kuhlmann, & Sauer, 2017, S. 1). Die

grundlegende Problemstellung für weitere Untersuchungen befasst sich aus diesen Gründen damit, welche Auswirkungen die dezentrale Nutzung erneuerbarer Energien auf die Produktionsplanung und -steuerung hat.

## **1.2 Zentrale Forschungsfragen und Ziele**

Ein grundlegendes Ziel dieser Diplomarbeit ist es, sich im ersten Schritt mit einer systematischen Literaturanalyse einen zusammenfassenden Überblick über den aktuellen Status der erneuerbaren Energien in der produzierenden Industrie zu verschaffen. Dabei wird zuerst einmal Aufschluss darüber gegeben, welche Möglichkeiten der dezentralen Erzeugung von erneuerbarer Energie für die industrielle Anwendung relevant sind und welche Form der Energieerzeugung am meisten Vorteile in diesem Einsatzfeld birgt. Ferner soll dieser Teil aufzeigen, welche Formen der Energiespeicherung dabei von Bedeutung sind. Weiterführend wurde dann darauf abgezielt darzustellen, welche Anforderungen speziell für die Produktionsplanung und -steuerung entstehen und welche Auswirkungen diese unter Verwendung erneuerbarer Energiequellen bewältigen muss. Ein zentraler Bestandteil davon ist, diverse Lösungskonzepte zur Abstimmung von Energieangebot und -nachfrage zu beleuchten. Am Ende der Recherche wird damit grundsätzlich feststehen, auf welche allgemeinen Herausforderungen Unternehmen treffen, die dezentrale erneuerbare Energie sowohl erzeugen als auch verbrauchen wollen. Dazu wird ebenso der aktuelle Entwicklungsstand der vereinten Darstellung von Güterproduktion und Elektrizitätsproduktion aufgezeigt, um klaren Aufschluss darüber zu erhalten, auf welche Art und Weise industrielle Energieverbrauchssysteme mit Energieerzeugungssystemen gekoppelt werden können.

Während der Auswertung der Literatur war grundsätzlich zu erkennen, dass auf dem Gebiet der energieflexiblen Produktion bereits verschiedene Forschungsansätze existieren und auch theoretische Lösungen ausgearbeitet sind. Die Mehrheit dieser Ansätze fokussiert sich jedoch nicht ausdrücklich auf die dezentrale Erzeugung aus rein erneuerbaren Energiequellen. Vielmehr steht häufig das intelligente Nutzen der aktuellen Preisschwankungen am Strommarkt im Mittelpunkt dieser Analysen. Grundsätzlich konnte also festgestellt werden, dass hinsichtlich der Auswirkungen der explizit dezentral und sauber erzeugten Energie auf die Produktionsplanung und -steuerung eine Forschungslücke besteht.

Im Zusammenhang damit gewinnen grundsätzlich auch Batteriespeicher für Unternehmen immer mehr an Bedeutung. Die Einsatzmöglichkeiten von Stromspeichern liegen

aus Sicht der Firmen vor allem in den Bereichen der Optimierung des Lastmanagements, der Bereitstellung von Regelenergie und der Reduktion von Fremdstrombezug (Halstrup & Schriever, 2018). Diese Entwicklung miteinbeziehend, lag es nun nahe, die Forschungsfragen der Diplomarbeit zusammenfassend wie folgt zu formulieren:

- Welche Herausforderungen entstehen für das Energiemanagement (EM) und die PPS produzierender Unternehmen, wenn diese vermehrt erneuerbare, dezentrale Energieerzeugungskonzepte und Speichertechnologien nutzen möchten?
- Welche Konzepte, Tools und Lösungen gibt es seitens der Forschung (state-of-research) und existieren bereits bewährte Erfolgsmodelle (best-practice) auf diesem Gebiet?
- Wie können die beschriebene Problemstellung und die dazu erarbeitete Lösung im Sinne der Abstimmung von Energieangebot und geplantem Produktionsprogramm mittels einer Simulation unterstützt werden?

Bezüglich des Simulationsmodells wird mit diversen variablen Eingangsgrößen, wie z.B. der Höhe der Stromerzeugung, der elektrischen Speicherkapazität und dem geplanten Produktionsprogramm gearbeitet. Schlussendlich wird das selbstständig programmierte Simulationsmodell dann in Form einer Fallstudie auf verschiedene Szenarien angewendet, um die Auswirkungen der entwickelten Szenarien auf die Produktionsplanung und -steuerung bewerten zu können.

Zusammenfassend können nun auf Grundlage der vorangegangenen Erläuterungen folgende Ziele der Diplomarbeit formuliert werden:

- Die systematische Darstellung der Anforderungen an eine Kombination/Koordination des EM mit der PPS.
- Die systematische Darstellung von Lösungsansätzen für eine vereinte Implementierung von EM und PPS.
- Entwicklung eines Simulationsmodells und einer beispielhaften Simulationsstudie zur Unterstützung der Planung von kombinierten EM/PPS-Systemen.

### 1.3 Vorgehensweise und Methodik

Methodisch wird die Diplomarbeit über die ingenieurwissenschaftliche Herangehensweise entwickelt. Ausgehend von der erläuterten Problemstellung wird mittels einer systematischen Literaturanalyse auf den aktuellen Stand der Forschung eingegangen. Zur allgemeinen Vorgehensweise bei einer systematischen Literaturanalyse wird hiermit auf die Ausführungen von Kitchenham verwiesen (Kitchenham, 2004). Um die relevantesten Lösungen bezüglich der ausgewählten wissenschaftlichen Fragestellungen zu identifizieren, werden die Analyseergebnisse qualitativ ausgewertet. Die abschließende Entwicklung eines Simulationsmodells zur besseren Planung von dezentralen, erneuerbaren Energieversorgungssystemen in der Industrie kann ebenso als qualitative Zielsetzung eingeordnet werden.

In Bezug auf die Vorgehensweise erfolgte zuerst die Darstellung der theoretischen Grundlagen der dezentralen, erneuerbaren Energieerzeugung in der Industrie mittels explorativer Literaturrecherche (Kapitel 2). Danach wurden die zentralen Anforderungen an kombinierte EM/PPS-Systeme auf Basis einer systematischen Literaturrecherche erhoben und in einer *Concept Map* zusammengefasst (Kapitel 3.2). Im Anschluss daran konnte die systematische Literaturrecherche auf maßgebliche Lösungskonzepte hinsichtlich der kombinierten EM/PPS-Systeme ausgeweitet werden (Kapitel 3.3). Um anhand der dadurch gewonnenen theoretischen Systemlösungen zur Verbindung der PPS mit den dezentral implementierten erneuerbaren Energiequellen einen Bezug zur Realität herzustellen, wurde deren Zusammenspiel in einem selbständig entwickelten Simulationsmodell untersucht und anschließend visualisiert (Kapitel 3.4). Die dadurch gewonnenen Erkenntnisse wurden mittels einer Fallstudie über verschiedene Szenarien generiert. Damit sollte die entwickelte Simulation als Planungstool fungieren und verschiedenen Unternehmen die Chance bieten, sich so weit wie möglich an die realen, industriellen Gegebenheiten anzunähern.

Die einzelnen Phasen der Diplomarbeit wurden iterativ abgearbeitet. Dies bedeutet, dass die Ergebnisse der Auswertung laufend in die Optimierung der angestrebten Systemlösung und der Simulation einfließen konnten.

## **2 Theoretische Grundlagen**

### **2.1 Dezentrale, erneuerbare Energieerzeugung in Industrie und Gewerbe**

#### **2.1.1 Definition und Charakterisierung dezentraler, erneuerbarer Energieerzeugung**

Der Begriff der „dezentralen Energieerzeugung“ beschreibt ein System, in dem der Endverbraucher selbst im Besitz der zur Elektrizitätserzeugung notwendigen Anlagen ist. Jeder Akteur dieses Systems verkörpert in diesem Sinne sowohl den Erzeuger als auch den Verbraucher der vor Ort benötigten Energie und wird aufgrund dessen oftmals als sogenannter „Prosumer“, also einem Zusammenschluss aus Produzent und Konsument betitelt (vgl. Brauner, 2016, S. 29 ff.). Von außerordentlicher Bedeutung sind in diesem Zusammenhang die solar- und windbasierten Erzeugungstechnologien, die sich aufgrund ihres inhärent dezentralen Charakters besonders für die lokal ansässige Energieerzeugung eignen. Grundsätzlich betrachtet, zählt die aus Solarstrahlung und Windkraft gewonnene Energie zu den sog. variablen erneuerbaren Energien (VEE). Der Charakter dieser VEE kann prinzipiell durch die folgenden Eigenschaften beschrieben werden. Zum einen gelten diese Energiequellen als durch natürliche Prozesse bereitgestellte, unerschöpfliche Ressourcen, die dem Nutzer in fluktuierender Ausprägung zur Verfügung stehen. Zum anderen zeichnen sie sich dadurch aus, dass die durch sie initiierte Leistungserzeugung nicht beliebig erhöht, sondern nur reduziert werden kann. Des Weiteren sind die VEE im Vergleich zu den herkömmlichen fossilen Energieträgern signifikant volatil, d.h. im Zeitverlauf deutlich unbeständiger und stärkeren Schwankungen unterlegen (vgl. Beier, 2017, S. 27 ff.). Unterdessen müssen neben den eben angesprochenen zeitlichen Schwankungen, welche sowohl durch jahreszeitliche als auch meteorologische Einflüsse hervorgerufen werden, zugleich erhebliche räumliche Energieangebotsvariationen in Betracht gezogen werden (vgl. Joos, 2016, S. 60). Unter Berücksichtigung dieser Eigenschaften kann der Ansatz der dezentralen, erneuerbaren Energieversorgung durchaus als Systemumbruch und Konkurrenzmodell zu den zentralen und fossilen Versorgungsstrukturen verstanden

werden. Im Vordergrund dieses Umbruchs stehen dabei diverse Zielsetzung, wie z.B. das Bestreben sowohl die Versorgungssicherheit als auch die Versorgungsunabhängigkeit aller Endverbraucher zu erhöhen. Gleichzeitig soll der direkte Verbrauch der Elektrizität auf gleicher Netzebene verhindern, dass die Netze durch den kontinuierlichen Zubau erneuerbarer Erzeugungsanlagen überlastet werden und infolge dessen kostspielig ausgebaut werden müssen. Nicht zuletzt trägt die angestrebte Maximierung des Eigenverbrauchs der erneuerbar produzierten Elektrizität seitens der Endverbraucher ebenso zur Schonung fossiler Ressourcen und damit der gesamten Umwelt bei (vgl. Brauner, 2016, S. 30-33).

## 2.1.2 Grundlagen der Photovoltaik

### Energieangebot

Die Technologie der Photovoltaik beruht grundsätzlich auf der Verwendung der von der Sonne bereitgestellten Strahlungsenergie. Die Dichte dieser Strahlungsleistung beträgt außerhalb der Erdatmosphäre in etwa  $1341 \text{ W/m}^2$ . Durchdringen die Strahlungswellen die Luftmassen der globalen Atmosphäre, wird ein Teil der Strahlung absorbiert. Bei steiler Penetration, also hohem Stand der Sonne zur Tagesmitte, werden dabei die geringsten Dämpfungswerte erreicht. Die stärkste Dämpfung erfährt die Solarstrahlung demnach konsequenterweise bei niedrigem Sonnenstand in den Morgen- und Abendstunden. In Summe werden auf diese Weise zwischen 20 und 40% der Solarstrahlung durch die Atmosphäre aufgenommen. Schlussendlich bedeutet dies, dass an der Erdoberfläche zwischen  $800$  und  $1100 \text{ W/m}^2$  Strahlungsleistung zur Verfügung stehen. Abb. 1 verdeutlicht dies nochmals in Bezug auf die täglichen Globalstrahlungswerte zu den Sonnwendzeiten am Standort Wien.

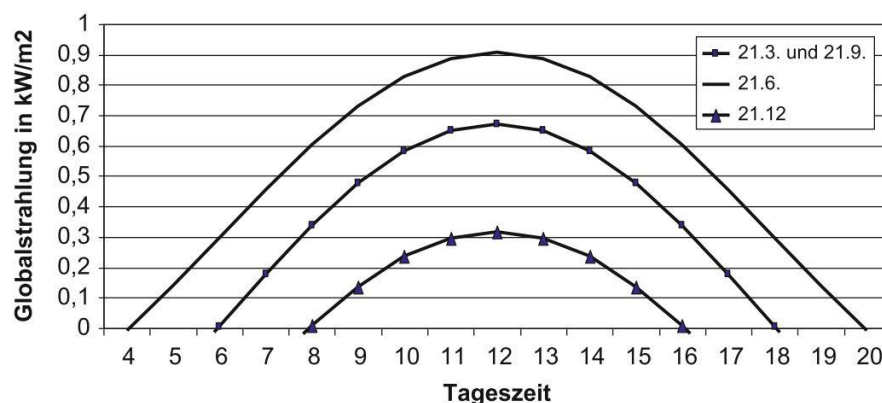


Abbildung 1: Jahreszeitenabhängige Globalstrahlung in Wien auf horizontale Fläche (Brauner, 2016, S. 63)

Gleichzeitig ergeben sich, wie in Abb. 2 verdeutlicht, gemäß der obigen Erklärung auch unterschiedliche Werte in Abhängigkeit vom betrachteten Breitengrad. Je mehr sich eine Region an den Zenit der Sonne annähert, desto höher ist die entsprechende lokal wirkende Solar- bzw. Globalstrahlung (vgl. Brauner, 2016, S. 61 ff).

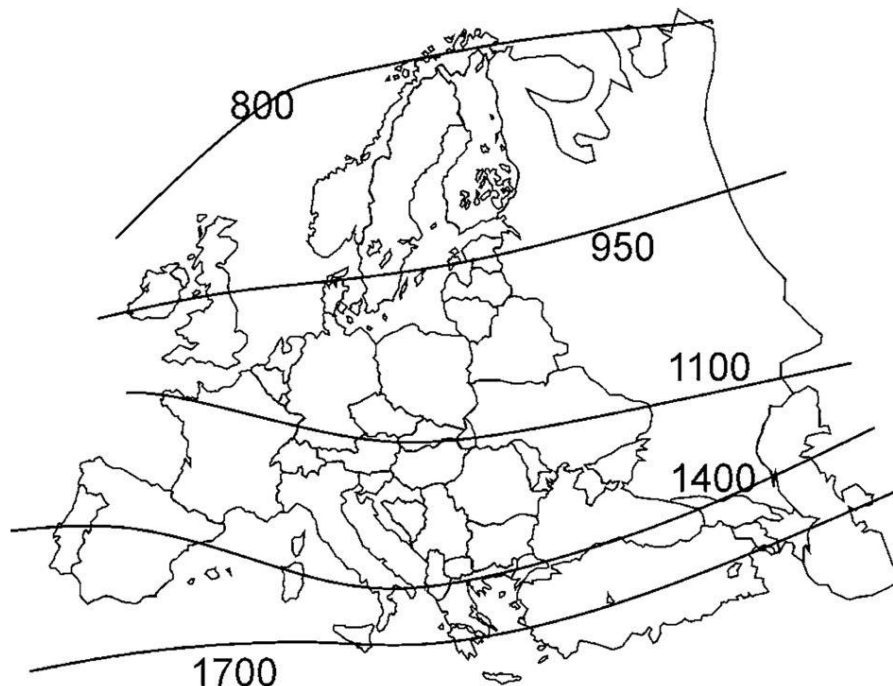


Abbildung 2: Globalstrahlung in Europa in kWh/m<sup>2</sup> im Jahr (Brauner, 2016, S. 63)

## Planung und Installation

Ziel jeder Installation einer Photovoltaik-Anlage (PV-Anlage) ist es, die einfallende Sonnenstrahlung, welche prinzipiell aus einem Diffus- und einem Direktstrahlungsanteil besteht, optimal zu nutzen. Der diffuse Strahlungsanteil fällt sehr gleichmäßig aus dem gesamten Umfeld der PV-Anlage ein und wird deswegen durch die horizontale Orientierung der PV-Module bestmöglich genutzt. Für die optimale Verwertung der Direktstrahlung müssten die PV-Module dem Lauf der Sonne stetig nachgeführt werden. Wie nun auf einer Vielzahl heutiger Dächer zu beobachten ist, wird in der Praxis überwiegend ein Kompromiss aus beiden Optima gefunden. Dementsprechend wird der Großteil der Solarmodule fest verankert und mit einem Anstellwinkel von 30° bis 45° gegen Süden ausgerichtet.

Um bei der Planung einer PV-Anlage die ersten Ertragsprognosen zu erlangen, kann ferner anhand des Zusammenspiels von Azimut-Winkel  $\alpha$  und Anstellwinkel  $\beta$

abgeschätzt werden, welche Jahressummen der Globalstrahlung zu erwarten sind. Im mitteleuropäischen Raum können mittels Süd-Ausrichtung ( $0^\circ$ ) und einem Anstellwinkel von  $30^\circ$  die größten Jahreserträge erzielt werden, wenngleich  $\alpha$ -Abweichungen von  $\pm 45^\circ$  und  $\beta$ -Abweichungen von  $\pm 15^\circ$  den Gesamtertrag auf etwa 95% senken. Abb.3 verdeutlicht dies für die Stadt Kassel in Deutschland (vgl. Wesselak & Voswinckel, 2016, S. 24 ff).

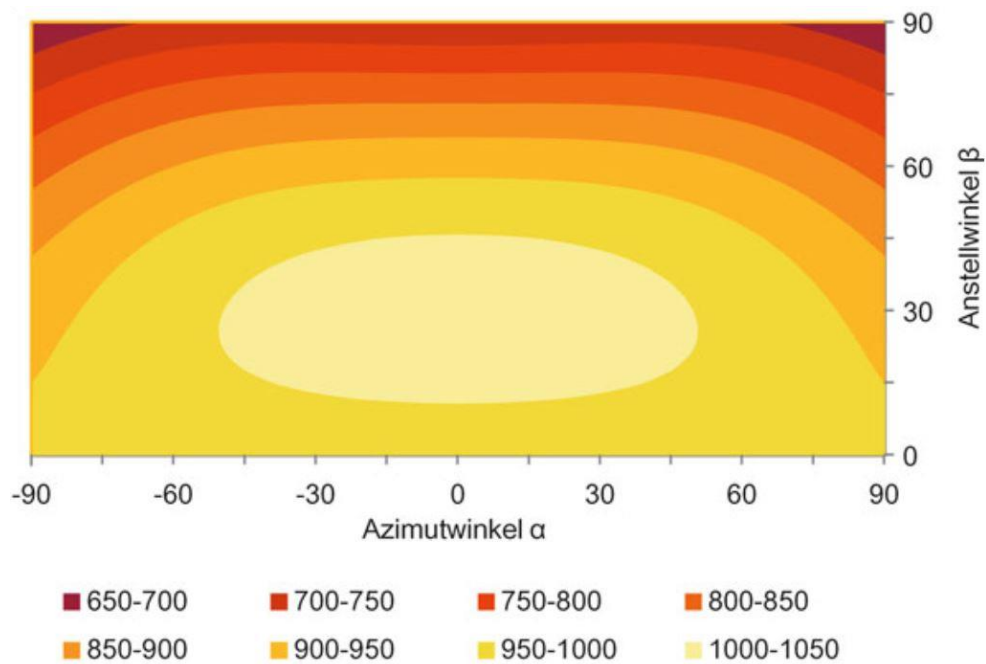
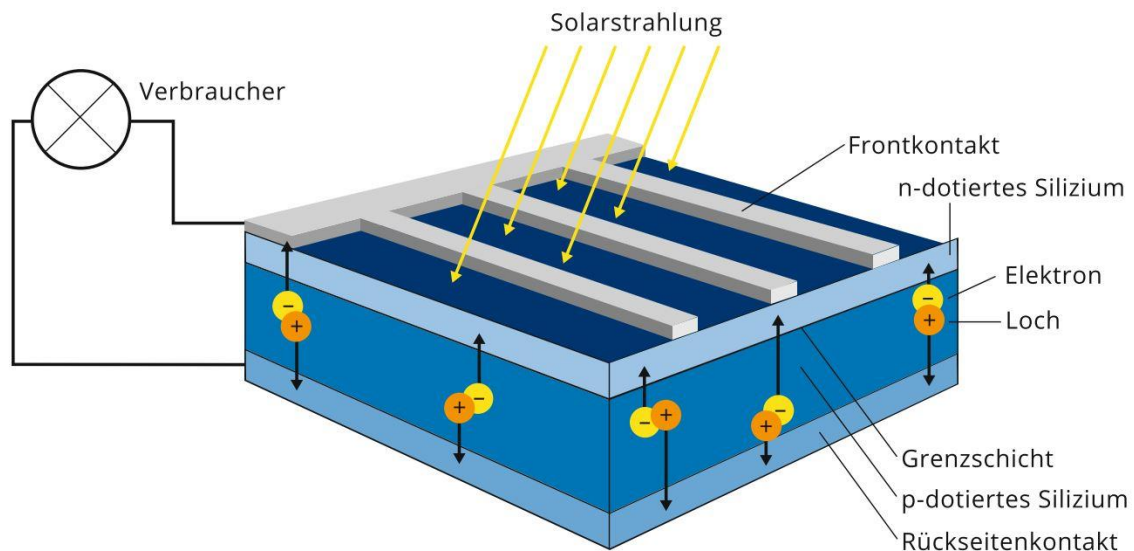


Abbildung 3: Jährliche Globalstrahlungswerte für die Stadt Kassel in kWh/m² (Wesselak & Voswinckel, 2016, S. 26)

### Technologiebeschreibung

Die Vorgänge innerhalb einer Solarzelle sind als eigentlicher Ursprung der produzierten elektrischen Energie zu verstehen. Die Zelle selbst besteht aus einer dünnen n-dotierten und einer stärkeren p-dotierten Schicht an deren Grenzfläche bereits ohne Sonneneinstrahlung ein sogenanntes Raumladungsfeld existiert (vgl. Schwab, 2006, S. 237). Der Begriff Dotierung bedeutet grundsätzlich, dass der elektrische Charakter von Halbleiterkristallen durch das kontrollierte Einfügen von Fremdatomen verändert wird. Bei der n-Dotierung besetzt das Fremdatom einen regulären Gitterplatz und verursacht durch seine Fünfwertigkeit einen Elektronenüberschuss der es zum sog. Donator-Atom macht. Die gleiche Systematik gilt ebenfalls für die p-Dotierung, mit dem Unterschied, dass hierbei Elektronenlöcher durch ein dreiwertiges Fremdatom geformt werden und infolgedessen ein sog. Akzeptor-Atom entsteht (vgl. Schröder, 2006, S. 17 ff). Wird die p-n-Grenzfläche nun mit Photonen aus dem Sonnenlicht bestrahlt,

bewegen sich die Überschusselektronen aufgrund des Potenzialgefälles in der Raumladungszone zum Plus-Pol und die Elektronenlöcher wiederum zum Minus-Pol (Abb. 4). Zwischen Frontkontakt und Rückseitenkontakt entsteht ein zur Bestrahlungsstärke proportionaler Photostrom (vgl. Crastan, 2017, S. 435).



**Abbildung 4: Vorgänge in einer bestrahlten Solarzelle (Wietschel, Ullrich, Markewitz, & Schulte, 2015, S. 124)**

Die für den kommerziellen Leistungsgebrauch aktuell zweckmäßigste Zelltechnologie ist zweifelsohne die mono- bzw. polykristalline Siliziumzelle. Die große Mehrheit der heute installierten PV-Anlagen beruht auf dieser Technologie. Mit realen Wirkungsgraden zwischen 12% und 18% gilt sie prinzipiell als bereits gut entwickelt. Ein entscheidender Nachteil dieser Module ist der vergleichsweise hohe Preis, der zu mehr als 50% durch das Zellmaterial selbst verursacht wird. Aufgrund dessen wird derzeit im Forschungsfeld der Dünnschichtsolarzellen versucht, die Zelldicke der Siliziumzellen von 200 µm auf unter 100 µm zu dezimieren. Diese Dünnschichtzellen eröffnen durch die Kombination von mikrokristallinen und amorphen Solarzellen vielversprechende Möglichkeiten hinsichtlich der Reduzierung des Materialaufwands und damit auch der Herstellungskosten (vgl. Crastan, 2017, S. 450 ff.). Für technisch detailliertere Einblicke in das Feld der Photovoltaik wird auf die entsprechende Literatur verwiesen (Crastan, 2017, S. 429-472).

### 2.1.3 Grundlagen der Windkraft

Im Kontrast zur im Abschnitt der Photovoltaik beschriebenen direkten Nutzung der Solarenergie, bedient sich die Windenergie im indirekten Sinne am Energieangebot der Sonne. Aufgrund ihrer vielfältigen Beschaffenheit erwärmt sich die Erdoberfläche bei Einstrahlung der Sonne auf sehr unterschiedlicher Art und Weise. Die dadurch resultierenden Dichte- und Druckunterschiede in den oberflächennahen Luftschichten initiieren zeitlich variable Ausgleichsströmungen, die uns allgemein als Wind geläufig sind. Mit Hilfe sogenannter Windenergieanlagen (WEA) kann die in den Luftströmungen enthaltene kinetische Energie mittels Rotorblätter zuerst in mechanische Rotationsenergie und anschließend unter Verwendung eines Generators in elektrische Energie transformiert werden. Grundsätzlich kann dabei zwischen zwei physikalischen Wirkprinzipien unterschieden werden. Das Widerstandsprinzip bedient sich der Widerstandskraft einer vom Wind angeströmten Fläche und nutzt dabei maximal 20% der zur Verfügung stehenden Windenergie. Die deutlich effizientere Variante dazu beruht auf dem sogenannten Auftriebsprinzip. Beim Umströmen der Rotorblätter entsteht hierbei, ähnlich wie bei den Tragwerken eines Flugzeugs, eine Auftriebskraft die eine Rotationsbewegung des Rotors zur Folge hat. In der Praxis können durch dieses Prinzip zwischen 45% und 52% der ursprünglichen Windenergie verwertet werden (vgl. Wietschel, Ullrich, Markewitz, & Schulte, 2015, S. 103 ff).

#### Vertikale Windenergieanlagen

Hinsichtlich der Bauformen verschiedener Windradtypen bestehen heutzutage diverse Möglichkeiten. Neben der Differenzierung nach dem Wirkprinzip hat sich eine Unterscheidung nach konstruktiven Merkmalen bewährt. Als offensichtlichstes Unterscheidungsmerkmal dient dabei die vertikale bzw. horizontale Lage der Drehachse des Windrotors. Zu den geläufigsten WEA mit vertikaler Drehachse zählen der Savonius-Rotor, der Darrieus-Rotor und der H-Rotor (Abb. 5), deren charakteristischer Vorteil vor allem in ihrer Unabhängigkeit bezüglich der vorherrschenden Windrichtung liegt. Des Weiteren zeichnen sich diese Windradtypen durch einen vergleichsweise schlichten Aufbau aus, der es gleichzeitig ermöglicht sowohl mechanische als auch elektrische Bauteile in Bodennähe zu installieren. Als bedeutender Nachteil besteht dagegen die fehlende Option die Leistungsabgabe der Anlage durch das Bewegen der Rotorblätter zu steuern (vgl. Hau, 2016, S. 68).

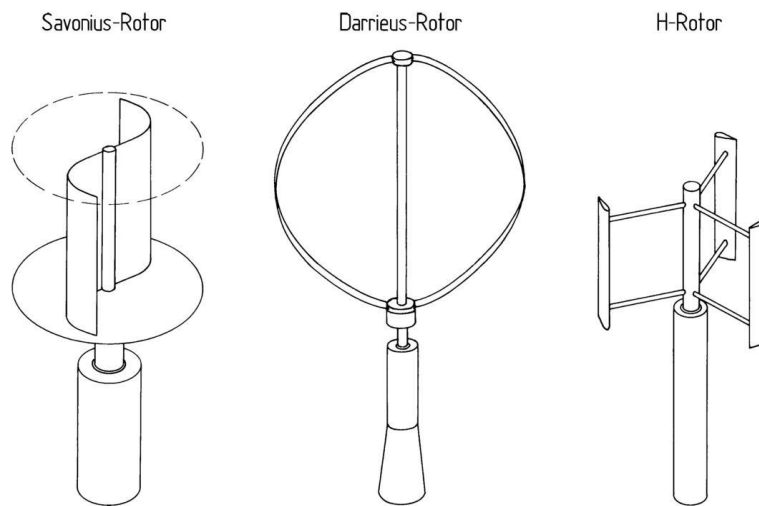


Abbildung 5: Windrotorformen mit vertikaler Drehachse (Hau, 2016, S. 68)

## Horizontale Windenergieanlagen

Wie nun am heutigen Landschaftsbild unschwer zu erkennen ist, haben sich dreiflügelige Windkraftanlagen mit horizontaler Drehachse am Markt durchgesetzt. Die Überlegenheit dieser Bauweise stützt sich zum einen auf die Option der aerodynamischen Auslegung der Rotorblätter hinsichtlich des höchsten Wirkungsgrades. Zum anderen kann die Drehzahl und somit die Abgabe an elektrischer Leistung durch das Verstellen der Rotorblätter um ihre Längsachse geregelt werden. Unterdessen wird damit sichergestellt, dass die WEA bei extremen Windgeschwindigkeiten vor dem Überdrehen geschützt ist (vgl. Hau, 2016, S. 71). Der prinzipielle Aufbau einer WEA dieser Ausführung ist in Abbildung 6 nochmals dargestellt.

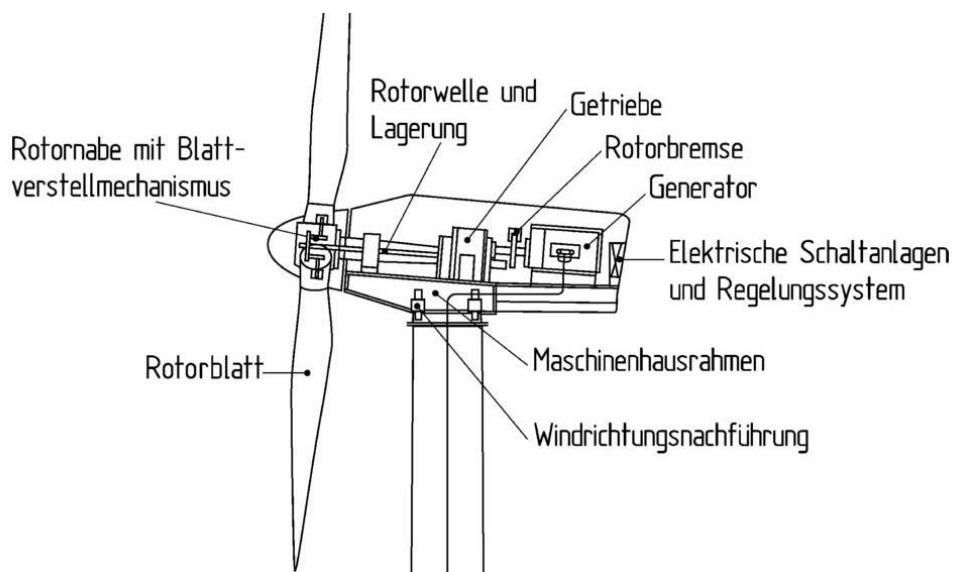


Abbildung 6: Windrotorform mit horizontaler Drehachse (Hau, 2016, S. 73)

Die durchschnittliche Nennleistung der im Jahre 2015 auf dem Festland installierten Windenergieanlagen betrug laut Hartmann et al. zwischen 2,2 und 2,4 Megawatt (MW) und wird bis 2050 unter Reifung der Anlagentechnik auf etwa 4-5 MW ansteigen. Dieser Trend ist größtenteils der dimensionalen Weiterentwicklung der WEA geschuldet. Diesbezüglich beträgt die durchschnittliche Nabenhöhe einer Neuanlage momentan etwa 120m und soll bis zur Jahrhundertmitte auf ungefähr 15m anwachsen. Gleiches gilt für den Rotordurchmesser, der in diesem Zeitraum einen Sprung von aktuellen 90m auf circa 140m machen könnte (vgl. Wietschel et al., 2015, S. 119).

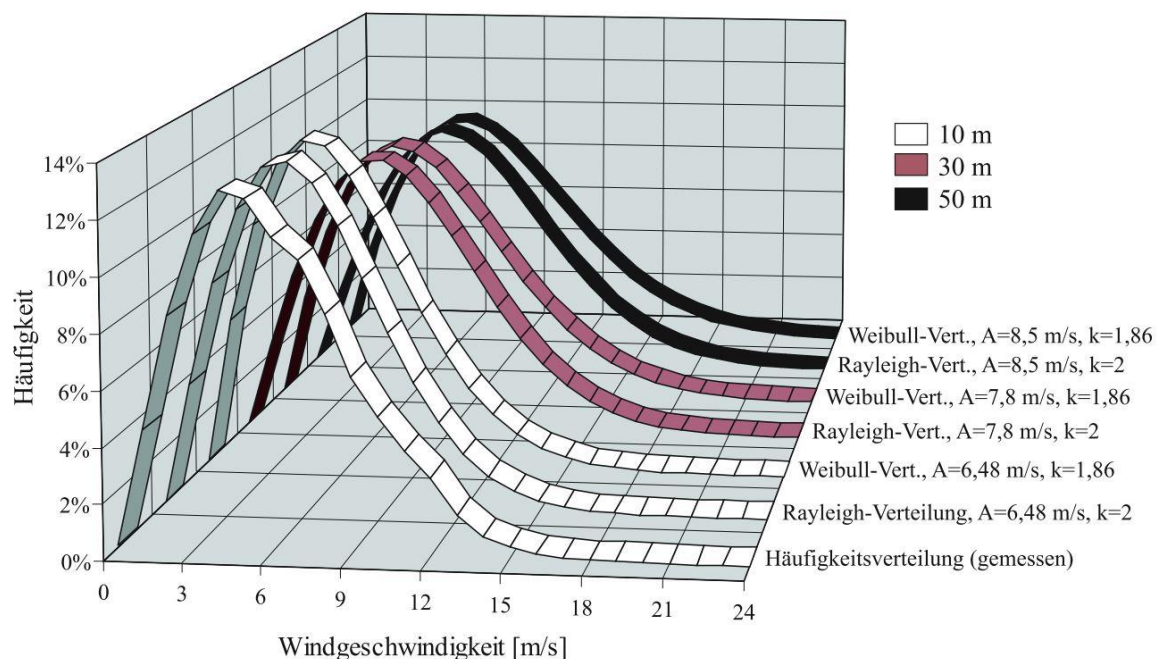
### **Kleinwindenergieanlagen**

Bei der Betrachtung dieser charakteristischen Werte liegt es nahe zu hinterfragen, ob die Kraft des Windes auch im Rahmen kleinerer Dimensionen, wie etwa beim Privatbesitz von Photovoltaik-Anlagen, genutzt werden kann. Eine mögliche Antwort darauf sind die sogenannten Kleinwindenergieanlagen (KWEA). Gemeinläufig definieren sich diese Anlagen über die vergleichsweise geringe Nennleistung, die bei unter 100kW liegen sollte. KWEA können sowohl im freien Gelände als auch dachintegriert errichtet werden und kamen bisher vor allem in gewerblichen und landwirtschaftlichen Betrieben zum Einsatz. Wie auch bei den großen WEA sind im Bereich der Kleinwindanlagen vielfältige Bauformen denkbar. In Übereinstimmung mit dem Trend bei herkömmlichen WEA, sind KWEA mit horizontaler Drehachse die populärste Anlagenausführung. Trotz allem können Vertikalläufer aufgrund ihrer geringen Geräuschentwicklung und der besseren Nutzung von turbulenten Strömungen gerade in besiedelten Gebieten von großem Vorteil sein (vgl. Wietschel et al., 2015, S. 107 f).

### **Energieangebot**

Um das Windkraftpotenzial eines bestimmten Standorts adäquat bewerten zu können, müssen die lokalen Gegebenheiten über einen längeren Zeitraum beobachtet und gemessen werden. Anhand einer Dauerlinie wird dabei festgehalten, welche Windgeschwindigkeiten mit welchen Häufigkeiten vorherrschten. Im Anschluss dazu können dann Aussagen über die theoretisch zu erreichende Leistung und somit des effektiv verfügbaren Energieangebots getroffen werden (vgl. Crastan, 2017, S. 403). Da die Leistung und damit die effektiven Erträge der WEA in der dritten Potenz von der Windgeschwindigkeit abhängen, d.h. also eine verdoppelte Windgeschwindigkeit die achtfache Strommenge zur Folge hat, ist die präzise Bewertung der örtlichen Windverhältnisse von entscheidender Bedeutung. Dazu zählt ebenfalls, dass Geländeverläufe,

Oberflächenbeschaffenheit und Hindernisse nahe dem potenziellen Anlagenstandort berücksichtigt werden. Da die Dauerlinien-Messungen für Anlagenhöhen von über 50m sowohl aus technischen als auch kostenbezogenen Gründen in der Praxis nur bedingt realisierbar sind, werden die ursprünglichen Messwerte aus Bodennähe (10m) auf die entsprechenden Anlagenhöhen extrapoliert. Wie in Abbildung 7 zu erkennen ist, geschieht dies zum Großteil mittels der sogenannten Weibull- oder Rayleigh-Häufigkeitsverteilung, welche unter Zuhilfenahme verschiedener Formparameter und Skalierungsfaktoren die angestrebten Richtwerte liefert (vgl. Heier, 2018. S. 477).



**Abbildung 7: Messungen in 10m Höhe, sowie Weibull- und Rayleigh-Verteilung für 30m und 50m Höhe (Heier, 2018. S. 478)**

Grundsätzlich nimmt sowohl die Geschwindigkeit als auch die Konstanz des Windes mit ansteigender Höhe zu. Dieses Phänomen beruht vor allem darauf, dass die in Bewegung befindlichen Luftmassen in Bodennähe der Rauigkeit der Erdoberfläche ausgesetzt sind und dabei durch Reibungskräfte abgebremst werden. Diese von starken Turbulenzen durchzogene Grenzschicht wird im Allgemeinen als sog. *Prantl-Schicht* charakterisiert. Die Mächtigkeit der Prantl-Schicht variiert je nach Topographie, Tageszeit und meteorologischen Einflüssen in etwa zwischen 10 und 150m (vgl. Hau, 2016 S. 574 f).

Um auf Grundlage des eben beschriebenen Mechanismus nochmal zu verdeutlichen, wie entscheidend die Standortwahl für die Effizienz von Windkraftanlagen verschiedener Ausführung ist, wird im folgenden Teil anhand zweier Windpotenzialkarten veranschaulicht, wie sehr die Windgeschwindigkeit von den lokalen Gegebenheiten abhängt. Diesbezüglich muss im Zuge einer Standortanalyse klar zwischen den geläufigen großen Windenergieanlagen und den Kleinwindenergieanlagen unterschieden werden. Des Weiteren ist auch zu beachten, ob die geplante Windkraftanlage im urbanen oder ländlichen Raum errichtet werden soll. In diesem Zusammenhang verdeutlicht Abbildung 8 die mittleren Jahreswindgeschwindigkeiten in 50 m über der Erdoberfläche für ganz Österreich. Wie unschwer zu erkennen ist, variieren die Werte verteilt über das gesamte Staatsgebiet. Abgesehen von den hoch gelegenen Gipfelregionen der Alpen weist der Nordosten des Landes die höchsten durchschnittlichen Windgeschwindigkeiten auf. Die Aussagen dieser Abbildung spielen aufgrund der Höhe von 50 m vor allem für die regulären Windenergieanlagen eine Rolle.

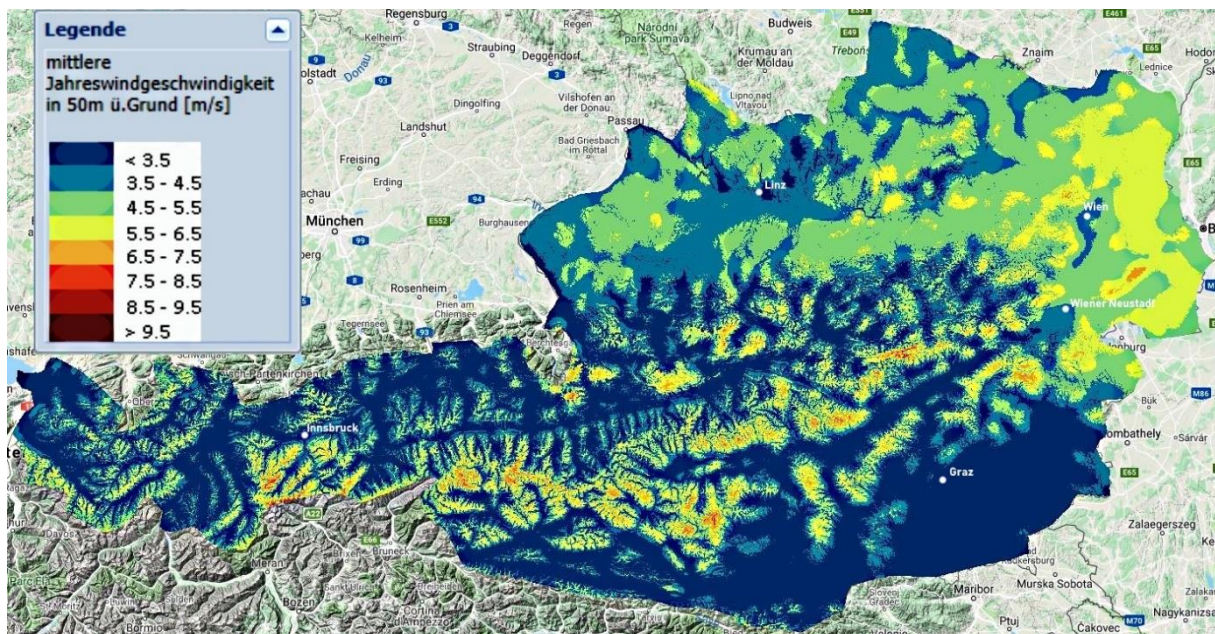


Abbildung 8: Mittlere Jahreswindgeschwindigkeiten (50m) in Österreich (Energiewerkstatt & ISpace, 2018)

Betrachtet man nun die Windverhältnisse in einer Höhe von 10 m über der Modelltopographie, in Abbildung 9 den Großraum Wien betreffend, so ist zu erkennen, dass die Windgeschwindigkeiten auch auf kleinstem Raum variieren können. Diese Werte sind wiederum für Kleinwindenergieanlagen von besonderer Relevanz. In der Regel ist die Modelltopographie dabei als eine Kombination aus Orographie (natürliches

Relief der Erdoberfläche) und mittlerer Gebäudehöhe definiert. Laut eines Berichtes der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) unterteilt man das Windenergiepotenzial für Kleinwindkraft in drei Kategorien. Hohes Potenzial besteht dabei für mittlere Jahreswindgeschwindigkeiten von über 4 m/s. Im Bereich zwischen 2,5 und 4 m/s ist folglich von einer mittelmäßigen Eignung auszugehen, während die Zonen mit durchschnittlichen Geschwindigkeiten von unter 2,5 m/s nur geringes Potenzial aufweisen (vgl. ZAMG, 2015, S. 24).

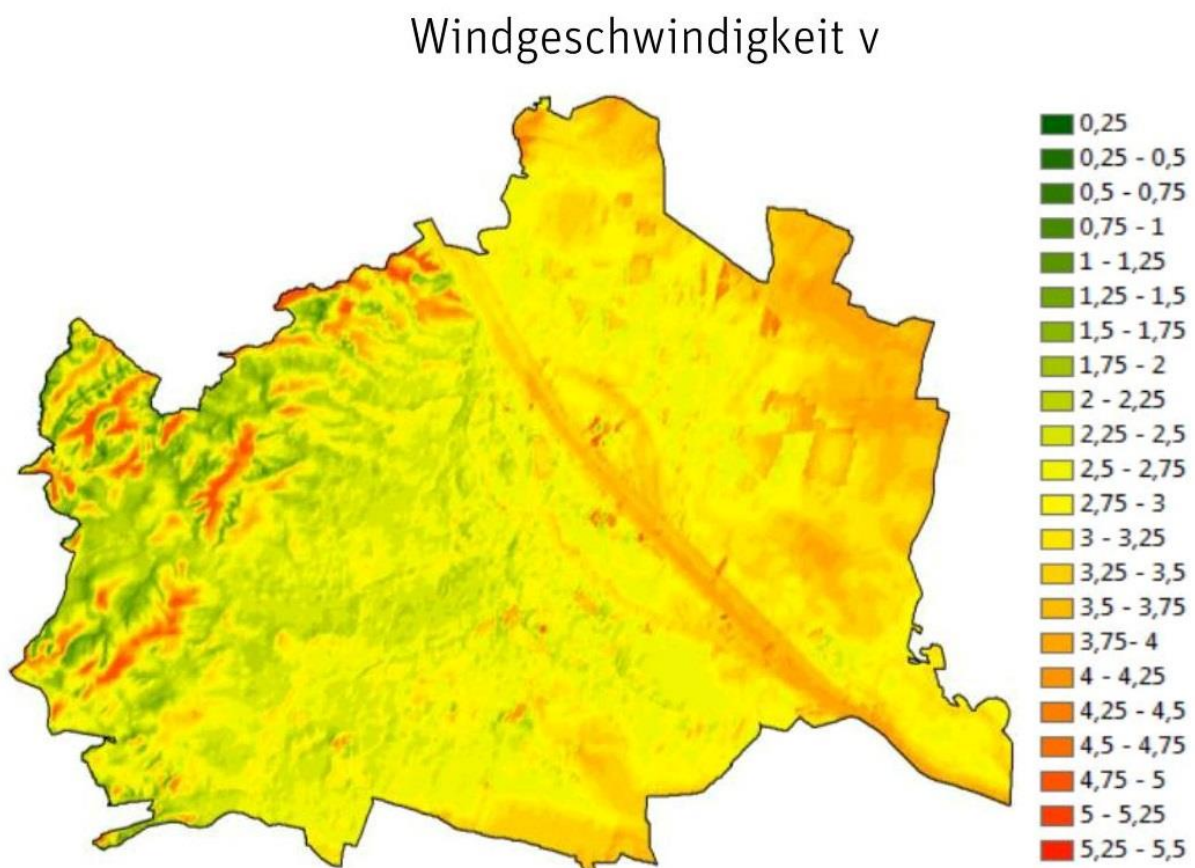


Abbildung 9: Mittlere Jahreswindgeschwindigkeiten (10m) im Großraum Wien (ZAMG, 2015, S. 24)

## 2.1.4 Relevanz für Industrie und Gewerbe

### Aktuelles Potenzial

Rund 45 % des deutschen Energiebedarfs geht auf die Sektoren der Industrie und „Gewerbe, Handel und Dienstleistungen“ (GHD) zurück. Um die Ziele einer zukünftig nachhaltigen Energieversorgung sowohl innerhalb als auch außerhalb Deutschlands zu realisieren, müssen gerade diese Bereiche Teil eines finanziell tragbaren, erneuerbaren Energieversorgungssystems werden. Betrachtet man beispielsweise das Gebiet der industriellen Antriebssysteme so ist festzustellen, dass diese gegenwärtig bereits nahezu komplett auf elektrische Antriebsweisen umgestellt wurden. Demnach wäre es also problemlos möglich, die aus der Photovoltaik und Windenergie gewonnene, erneuerbare Elektrizität ohne vorherige Modifikation der Produktionsanlagen einzubinden. Des Weiteren ist in diesem Zusammenhang festzuhalten, dass auch der Bereich der Prozesswärme vielversprechende Möglichkeiten eröffnet. Der Energiebedarf der industriellen Prozesswärmeversorgung wird momentan noch mehrheitlich durch fossile Ressourcen abgedeckt und kann durch substituierende elektrothermische Verfahren zu einem Schlüsselbereich in der Transformation hin zu einer regenerativen Energieversorgung werden (vgl. Brauner, 2016, S. 195). Tab. 1 bietet dazu einen ersten Einblick in den im Jahre 2014 gemessenen Energiebedarf der deutschen Industrie inklusive GHD. Besonders in den Bereichen der mechanischen Energie, Prozesswärme und Raumwärme sind große Anteile am Gesamtenergiebedarf auszumachen.

|                     | Gesamter Energiebedarf | Industrie           | GHD           |
|---------------------|------------------------|---------------------|---------------|
| summiert            | 44,0%                  | 29,0%               | 15,0%         |
|                     | 1058 TWh               | 697 TWh             | 361 TWh       |
| Anwendungsart       |                        | Industrie (relativ) | GHD (relativ) |
| Raumwärme           | 232 TWh                | 8,7%                | 47,5%         |
| Warmwasser          | 27 TWh                 | 0,9%                | 5,7%          |
| Prozesswärme        | 477 TWh                | 64,4%               | 7,9%          |
| Klimakälte          | 8 TWh                  | 0,7%                | 1,0%          |
| Prozesskälte        | 15 TWh                 | 0,8%                | 2,5%          |
| mechanische Energie | 208 TWh                | 21,8%               | 15,5%         |
| IKT                 | 29 TWh                 | 1,3%                | 5,4%          |
| Beleuchtung         | 62 TWh                 | 1,4%                | 14,5%         |
| Summe               | 1058 TWh               | 100,0%              | 100,0%        |

Tabelle 1: Deutschlands industrieller Energiebedarf nach Sektoren und Anwendungsarten im Jahre 2014 (in Anlehnung an Brauner, 2016, S. 197)

## **Synergien**

Über das Zusammenspiel von hohem Solarstrahlungsangebot im Sommer und starkem Windaufkommen in der kalten Jahreszeit ergänzen sich die Technologien der Photovoltaik und Windenergie im Laufe eines Jahres. Zukünftige Entwicklungen in einer dieser Sparten können in diesem Fall also als Komplement der anderen Branche angesehen werden (vgl. Wietschel et al., 2015, S. 131). Aufgrund der Tatsache, dass der Automatisierungsgrad im Gewerbe und der Industrie laufend zunimmt, gewinnt die energiebezogene Versorgungssicherheit zunehmend an Bedeutung. Eine unterbrechungsfreie, sichere Elektrizitätsversorgung der automatisierten Systeme ist dabei essentiell (vgl. Brauner, 2016, S. 61). Über die dezentrale vor-Ort-Nutzung von Photovoltaik- und (Klein-)Windenergieanlagen kann die Versorgungssicherheit, dank der eben beschriebenen Wechselwirkungen, mittels der eigenständig produzierten Elektrizität verstärkt werden (vgl. Wietschel et al., 2015, S.114).

## **Relevanz der Ressourceneffizienz**

Geht es speziell um die Relevanz der Ressourceneffizienz in der Industrie, so spielt auch die Bereitschaft der Unternehmen sich mit diesem Thema auseinanderzusetzen eine große Rolle. Eine Studie des Fraunhofer-Instituts für Arbeitswirtschaft und Organisation, in der 47 unterschiedlich große Unternehmen aus verschiedenen Branchen zum Thema Ressourceneffizienz befragt wurden, liefert folgende aussagekräftige Ergebnisse. Auf die Frage welche Themen für das Unternehmen von großem Interesse sind, antworteten 87% mit der Auswahlmöglichkeit der Energieeffizienz. 55% Prozent der Unternehmen bekräftigten, dass auch dem Umweltschutz eine große Bedeutung beigemessen wird, während sich 47% gleichzeitig für die CO<sub>2</sub>-Einsparung und den sonstigen klimarelevanten Fragestellungen entschieden (vgl. Fraunhofer IAO, 2010, S. 12). Eine weitere Fragestellung befasste sich speziell damit, welchen Stellenwert die Energieeffizienz bei der Entwicklung oder Verbesserung eines Produktes oder Produktionsprozesses mittels neuer Technologien gegenüber anderen Strategien einnimmt. 62% der Unternehmen bekräftigten hier, dass sie die Energieeffizienz mit hoher Priorität bearbeiten, während sich 17% sogar auf die Auswahlmöglichkeit der höchsten Priorität festlegten (vgl. Fraunhofer IAO, 2010, S. 15).

## 2.2 Dezentral relevante Stromspeicher-Technologien

Wie in Punkt 1.1 und 2.1 bereits verdeutlicht wurde, unterliegt die Elektrizitätserzeugung aus Photovoltaik und Windkraft einer starken Volatilität. Im Rahmen der Einbindung der erneuerbaren Erzeugungsanlagen in die heutigen Versorgungssysteme gelten, die durch den volatilen Charakter entstehenden Fluktuationen im Stromangebot und der Stromnachfrage als wahre Herausforderung. Im Zuge dessen wird den Stromspeichern zukünftig eine entscheidende Rolle beigemessen, da die vorübergehenden angebots- und nachfrageseitigen Unstetigkeiten mittels Speichernutzung ausgeglichen werden können (vgl. Halstrup & Schriever, 2018, S. 2).

Grundsätzlich unterteilt man das Gebiet der Stromspeicher in mechanische, elektrische, elektrochemische und chemische Speicher (Abb. 10). Angesichts ihrer technischen Eigenschaften sind die elektrochemischen Speicherlösungen, heutzutage vorwiegend als „Batterien“ oder „Akkumulatoren“ bekannt, im Stande kurzfristige Lasten zu verschieben und somit temporäre Schwankungen auszugleichen (vgl. Sterner & Stadler, 2017, S. 32f). Ferner sind die Batteriespeicher problemlos in kleinen, dezentralen Einheiten einsetzbar (vgl. Brauner, 2016, S. 81) und können noch dazu mit hohem Wirkungsgrad be- und entladen werden (vgl. Matzen & Tesch, 2017, S. 263). Aufgrund dieser Eigenschaften sind den Batteriespeichern eine hohe Relevanz im Feld der dezentralen Energieversorgungen beizumessen.

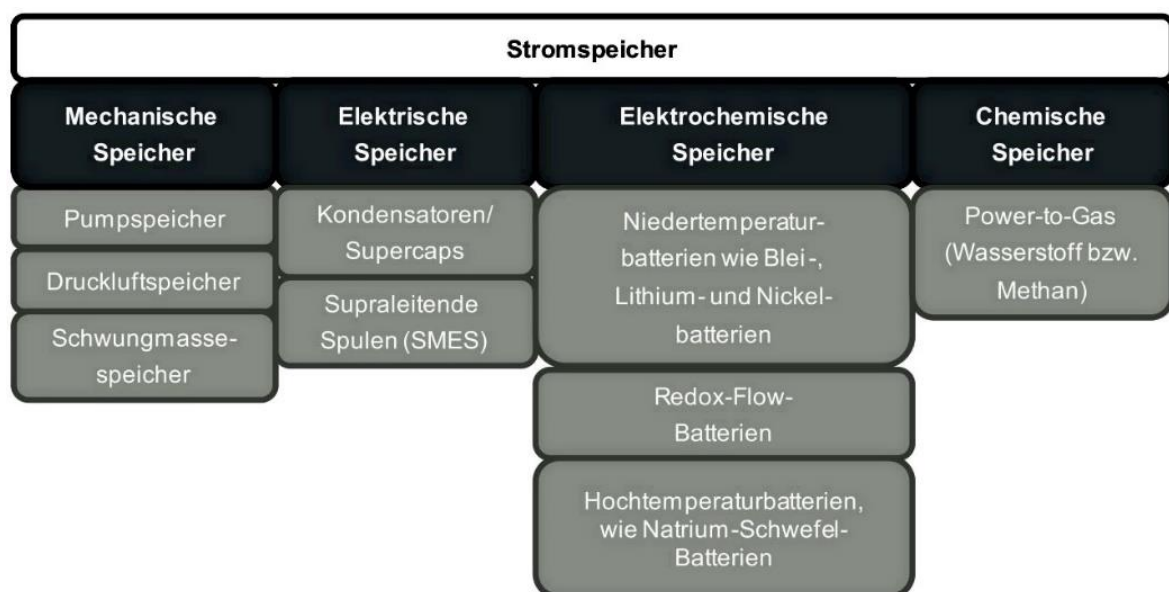


Abbildung 10: Unterteilung von Stromspeichern nach physikalisch-energetischen Gesichtspunkten (Zapf, 2017, S. 97)

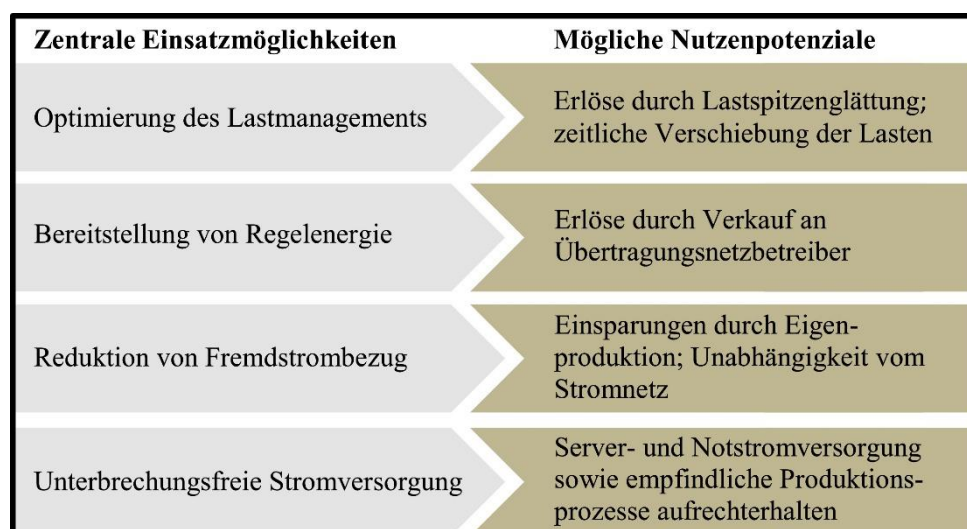
Sehr allgemein beschrieben bestehen die elektrochemischen Systeme aus mehreren Elektroden zwischen denen sich eine ionenleitende Phase, der sogenannte Elektrolyt, befindet. Wird dem Speicher elektrische Energie entnommen bzw. zugefügt, verschiebt sich die elektrische Ladungen auf Basis chemischer Reaktionen (vgl. Sterner & Stadler, 2017, S. 229).

Prinzipiell lassen sich die elektrochemischen Speicher in konventionelle Niedertemperatur-, Redox-Flow- und Hochtemperatur-Batterien unterteilen. Zu den Niedertemperatur-Batterien zählen beispielsweise die technisch bereits ausgereiften Blei-Säure-Batterien, deren relativ geringe Energiedichte, also der vergleichsweise geringe Energiegehalt pro Volumen oder Masse, die Anwendungsmöglichkeiten stark limitiert. Gerade im Hinblick auf das Anwendungsgebiet der E-Mobilität führte dies zu extensiven Forschungsaktivitäten im Bereich der Lithium-basierenden Batterien, einem weiteren Vertreter der Niedertemperatur-Akkumulatoren. Aufgrund dieser Aktivitäten ist aktuell eine progressive Entwicklung der Lithium-basierenden Batterien auf technischer, wirtschaftlicher und ökologischer Ebene zu beobachten. Durch weiteren Fortschritt auf diesem Gebiet, in erster Linie durch zukünftige Kostensenkungen, könnte der Einsatz der Lithium-basierenden Batterien eine flächendeckende Integration der variablen erneuerbaren Energien ermöglichen. Die zweite Kategorie der elektrochemischen Speicher, die bereits erwähnten Redox-Flow-Batterien, funktionieren grundsätzlich nach dem gleichen technologischen Prinzip wie die konventionellen Batterien mit dem Unterschied, dass das Elektrolyt in externen Tanks aufbewahrt wird und demnach auch ausgewechselt werden kann. Aufgrund dieses Aufbaus können die Energie- und Leistungsparameter der Redox-Flow-Batterie unabhängig voneinander konfiguriert werden. Um also beispielsweise die Ladekapazität einer bereits installierten Batterie zu erhöhen, ist schlichtweg das Elektrolytvolumen der Tanks zu erweitern. Im Gegensatz zu den bereits beschriebenen Vertretern der elektrochemischen Speicher, müssen die Hochtemperatur-Batterien während ihres Gebrauchs gewöhnlicherweise auf über 300° Celsius erhitzt werden. Ihrer langen Lebensdauer und hohen Energiedichte stehen damit insbesondere die durch Hitze und den risikoreichen Betrieb verursachten Effizienzverluste gegenüber (vgl. Beier, 2017, S. 37). Zusammenfassend bietet Tabelle 2 eine Übersicht über die bedeutendsten technischen und ökonomischen Parameter der elektrochemischen Speichertechnologien.

| Technologie                            | Technik       |                    |              |                 |             |              |
|----------------------------------------|---------------|--------------------|--------------|-----------------|-------------|--------------|
| Elektrochemische Energiespeicher       | Energiedichte |                    | Wirkungsgrad | Selbstentladung | Lebensdauer |              |
|                                        | Gravimetrisch | Volumetrisch       | %            | % / Tag         | Zyklisch    | Kalendarisch |
|                                        | Wh/kg         | kWh/m <sup>3</sup> |              |                 | Zyklen      | a            |
| <b>Niedertemperatur-Batterien</b>      |               |                    |              |                 |             |              |
| Blei-Säure-Batterien                   | 25-40         | 25-65              | 74-89        | 0,17            | 203-1500    | 10           |
| Nickel-Batterien                       | 55-75         | 60-105             | 71           | k.A.            | 350-2000    | k.A.         |
| Lithium-Batterien                      | 110-190       | 190-375            | 90-97        | 0,008-0,041     | 400-6000    | 15           |
| <b>Hochtemperatur-Batterien</b>        |               |                    |              |                 |             |              |
| Natrium-Batterien                      | 100-165       | 155-255            | 72-81        | k.A.            | 2500-8250   | 17           |
| <b>Batterien mit externem Speicher</b> |               |                    |              |                 |             |              |
| Redox-Flow Batterien                   | 16-41         | 20-60              | 70-79        | 0,3             | 7000-15000  | 17,5         |

**Tabelle 2: Bedeutenden technische und ökonomische Parameter der elektrochemischen Speicher (in Anlehnung an Sterner & Stadler, 2017, S. 649)**

Aktuellen Forschungsergebnissen zufolge kann sich die Anwendung von Stromspeichern in Unternehmen oder Unternehmensverbänden aus ökonomischer Sicht sehr wohl bezahlt machen. Von besonderem unternehmerischen Interesse ist dabei einerseits das optimierte Lastmanagement (Lastverschiebung und Lastspitzenglättung) und andererseits die Möglichkeit den Eigenverbrauchsanteil des vor Ort produzierten Stroms zu erhöhen (vgl. Halstrup & Schriever, 2018, S. 1). Abbildung 11 zeigt dazu welche Nutzenpotenziale mit dem Einsatz von Stromspeichern in Industrie und Gewerbe verbunden sein können. Eine von Vogt et al. veröffentlichte Studie behauptet in diesem Zusammenhang, dass sich die Installation eines Stromspeichers unter Nutzung dieser Potenziale bei einer Amortisationszeit von 10 Jahren wirtschaftlich lohnen kann (vgl. Vogt, Kempen, & Böcker, 2014, S. 6).



**Abbildung 11: Einsatzmöglichkeiten und Nutzenpotenziale von Stromspeichern aus unternehmerischer Sicht (Halstrup & Schriever, 2018, S. 3)**

## **2.3 Energiemanagement in der produzierenden Industrie**

In den vergangenen Jahrzehnten sorgten die wachsenden Bedenken über den Klimawandel und die stetig schwindenden Ressourcen für eine gewandelte Gesinnung hinsichtlich unserer Umwelt, sowohl in der Gesellschaft als auch in der Industrie. Heutige Unternehmen sehen sich zunehmend mit ansteigenden Energiepreisen, strengen Umweltauflagen und verstärktem Umweltbewusstsein seitens der Kunden konfrontiert. Geführt von diesem Paradigmenwandel gewinnt das Energiemanagement und die damit verbundene Energieeffizienz der Industrie immer mehr an Wert (vgl. May, Stahl, Taisch, & Kiritsis, 2017, S. 2).

Detailliertes Wissen über energiebezogene Prozesse zu erhalten und zu wahren, zählt zu den wesentlichen Voraussetzungen für die energieeffiziente Planung und Optimierung aller Fabriken und Produktionssysteme. Dabei erweist sich die Erlangung und Verarbeitung dieser Informationen oftmals als eine durchaus anspruchsvolle und zeitintensive Aufgabenstellung (vgl. Franz et al., 2017, S. 3). Im Zuge der Planung heutiger Produktionssysteme gewinnen die strategischen und auf langfristige Auswirkungen ausgerichteten Entscheidungen gegenüber den zeitweiligen und auf kurzfristigen Erfolg ausgelegten Investitionsentscheidungen immer mehr an Bedeutung. Im Zusammenhang damit kann parallel festgestellt werden, dass das energieorientierte Produktionsmanagement die Fertigungssysteme eines Unternehmens sowohl auf operativer als auch auf strategischer Ebene zu beeinflussen vermag (vgl. May, Stahl, & Taisch, 2016, S. 5f). Prinzipiell wird in den strategischen Energiezielen dabei festgelegt, welche globale Position das Unternehmen bezüglich des Umgangs mit dem Thema Energie verkörpern will. Die operativen Energieziele hingegen befassen sich mit konkreten Bestimmungen für Maschinen, Prozessabläufe und Gebäude (vgl. Matzen & Tesch, 2017, S. 417f).

Auf lange Sicht führt die optimale Nutzung der Ressource Energie zu einer Minimierung des Energiebedarfs, einem Rückgang der Abhängigkeiten von Energielieferanten und einem Erreichen anspruchsvoller Klimaziele. Überdies erfährt das Öffentlichkeitsbild energetisch fortschrittlicher Unternehmen eine deutliche Aufwertung durch das Engagement im Bereich der erneuerbaren Energieversorgung. Parallel zur optimalen Nutzung der Energie muss aber festgestellt werden, dass viele Zielkonzepte einer

industriellen Produktion wie z.B. das Lean-Management oder die Prozessoptimierung nicht immer problemlos mit dem Ziel eines reduzierten Energieeinsatzes zu vereinen sind (vgl. Matzen & Tesch, 2017, S. 415). Um diesen Zielkonflikt aus Sicht der Unternehmen dennoch gewinnbringend zu bewältigen, bietet sich die Möglichkeit der Implementierung eines Energiemanagementsystems (EnMS). Zertifiziert wird die Einführung eines solchen Systems beispielsweise nach DIN EN ISO 50001. Diese sehr verbreitete Norm fokussiert sich im Kern auf kontinuierliche Verbesserungsprozesse in Form des allgemein bekannten PDCA-Zyklus um den Unternehmen dabei zu helfen ihre Energieeffizienz durch die Errichtung entsprechender Prozess und Systeme zu steigern. Sie zielt darauf ab, das vorhandene Effizienzpotenzial der Firmen zu erschließen, die Energiekosten zu senken und umweltschädliche Emissionen zu reduzieren. Damit begleitet DIN EN ISO 50001 die Unternehmen dabei ihre strategischen Energieziele zu formulieren und diese durch konkrete Maßnahmen zu operationalisieren, während sie nebenher das Energie-Bewusstsein der Mitarbeiter stärkt (vgl. Franz et al., 2017, S. 3).

Abbildung 12 bietet einen zusammenfassenden Überblick über die wesentlichen Faktoren des Energiemanagements und deren Interaktion aus Sicht eines Betriebsmanagers. Im Zentrum der Darstellung sind die vier grau hinterlegten Schlüsselkomponenten des Energiemanagements auszumachen. Rechts daneben befindet sich die systematische Illustration der unterschiedlichen operativen Ebenen der Produktion. Im

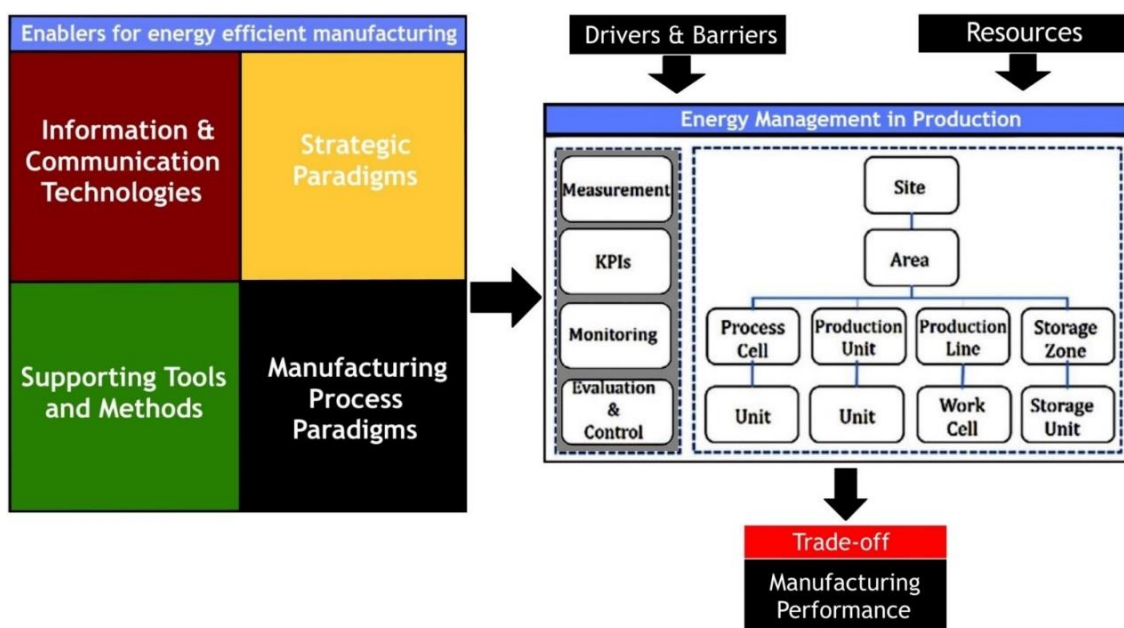


Abbildung 12: Schlüsselfaktoren im Rahmen des Energiemanagements in der produzierenden Industrie (in Anlehnung an May, Stahl, Taisch & Kiritsis, 2017, S. 11)

linken Teil der Darstellung sind die Wegbereiter der energieeffizienten Fertigung verdeutlicht, welche zusammen mit den Ressourcen als Input des eigentlichen Energiemanagements verstanden werden können. Des Weiteren erfolgt die Steuerung dieses Systems über verschiedene Treiber und Hindernisse, die bestimmte energiebezogene Projekte entweder vorantreiben oder beschränken. Als einziger Output ist die in einem Zielkonflikt befindliche Leistung des Unternehmens illustriert. Der sog. Trade-off bezieht sich hierbei auf die Auswirkungen der als neue Schlüsseldimension definierten Energieeffizienz auf die Dimension der konventionellen Schlüsselfaktoren. Präziser ausgedrückt befinden sich die traditionellen Leistungsmaßstäbe wie Kosten, Flexibilität, Lieferzeit und Qualität in einem Konflikt mit den modernen Zielstellungen der Energieeffizienz (vgl. May et al., 2017, S. 12f).

## **2.4 Energieökonomisch und -ökologisch relevante Bereiche der Produktionsplanung und -steuerung**

In Zeiten immer größer werdender Komplexität und Vielfalt von Konsumgütern unterstützt die Produktionsplanung und -steuerung (PPS) viele Unternehmen dabei ihre logistischen und wirtschaftlichen Ziele zu erreichen. Mittels Planung und Steuerung bestimmter Prozessgrößen wie z.B. der Durchlaufzeit, der Maschinenbelegung, des Produktionsvolumens und der Losgrößen sorgt die PPS dafür, dass die Herstellungsvorgänge präzise dargestellt und überwacht werden können. Ziehen es Unternehmen nun zukünftig in Betracht, sich auf Basis dezentraler Erzeugungsanlagen mit regenerativer Energie zu versorgen, so ist die Integration des Energiesystems in die PPS von entscheidender Bedeutung für die effiziente Umsetzung dieses Vorhabens (vgl. Keller, Braunreuther, & Reinhart, 2016, S. 1).

In vielen bestehenden Produktionssystemen werden das Material, die Arbeitskraft und die Produktionskapazitäten inklusive der damit verbundenen Kosten als wichtige Ressourcen berücksichtigt, während die Rolle der Energie oftmals vernachlässigt bleibt. Hinsichtlich ökonomischer und ökologischer Nachhaltigkeit zukünftiger Unternehmen ist die Anerkennung der Energie als gleichermaßen bedeutsame Ressource jedoch unabdingbar (vgl. Pechmann & Zarte, 2017, S. 1). Betrachtet man diesbezüglich die Energieerzeugung aus Sonne und Wind, so ist es im Speziellen deren fluktuierender

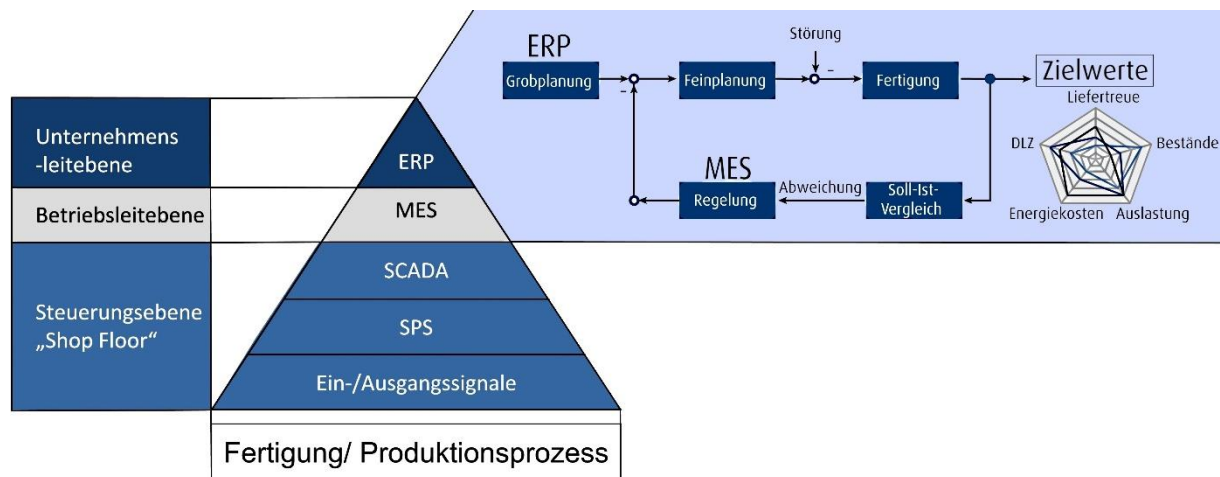


Abbildung 13: Energieregelsystem im Kontext der Automatisierungspyramide (in Anlehnung an (Kerkhoff, 2015, S. 2); (Haag, 2013, S. 43))

Charakter, der die PPS vor große Herausforderungen stellt. Im Gegensatz zur Versorgung aus kontinuierlichen Energiequellen, beispielsweise dem Bezug aus dem Netz, muss das Energieangebot hierbei durch kurz- und langfristige Vorhersagen abgeschätzt und auf die Nachfrage der Produktion abgestimmt werden (vgl. Keller et al., 2016, S. 2). Unterdessen muss in diesem Zusammenhang auch bekräftigt werden, dass die flexible und effiziente Eingliederung der Energie nur dann von wirtschaftlichem Vorteil sein kann, wenn die altbewährten logistischen Zielgrößen, wie z.B. die Liefertreue, nicht gänzlich zum Vorteil des Energiesystems vernachlässigt werden (vgl. Reinhart & Schultz, 2014, S. 2).

Effektiv ist es möglich, das Zielsystem der PPS um den Faktor der Energieeffizienz zu erweitern. Grundsätzlich besteht dazu die Option, die IT-Planungssysteme der Produktion, gewöhnlicherweise das *Enterprise Resource Planning* (ERP) und die *Manufacturing Execution Systems* (MES), um ein energiebezogenes System zu erweitern (vgl. Sobottka, Kamhuber, & Sihn, 2017, S. 2). Allgemein können die MES-Systeme als Bindeglied zwischen der auf Unternehmensleitebene befindlichen ERP-Funktionen und der darunterliegenden Steuerungsebene verstanden werden. Mittel- und langfristige Auftragspläne werden durch das MES unter Berücksichtigung bestimmter Einschränkungen, wie z.B. der Maschinenverfügbarkeit, in effektive Fertigungsaufträge übersetzt. Erweitert man dieses System nun um den Faktor der Energie, entsteht eine weitere Zielgröße, die in Wechselwirkung mit den bisherigen Zielwerten treten kann (Abbildung 13). Beispiele dafür sind Abweichungen im Personaleinsatz, der Maschinenauslastung oder der Durchlaufzeit aufgrund energetisch motivierter

Verzögerungen bestimmter Fertigungsaufträge (vgl. Kerkhoff, 2015, S. 3). Das MES ist des Weiteren in der Lage, neben den regulären Betriebs- und Maschinendaten auch Energiedaten verschiedener Anlagen und Energiezähler zu kommunizieren und zu verwerten. Dabei verknüpft das MES die Energiedaten direkt mit den Produktionsdaten des Unternehmens und verschafft sich dadurch einen Vorteil gegenüber anderen separat arbeitenden Energiemanagementsystemen (vgl. Reinhart & Schultz, 2014, S. 2).

Neben der ökonomischen Relevanz wird der Produktionsplanung und -steuerung zukünftig auch verstärkte ökologische Bedeutung beigemessen. Betrachtet man den Treibhausgas-Ausstoß fertiger Güter, verteilt über ihren gesamten Lebenszyklus, ist festzustellen, dass ein Großteil der Emissionen durch die Produktion und der damit verbundenen nachgelagerten Prozesse verursacht wird. Ein starker Fokus auf ressourceneffiziente Produktionstechniken könnte in diesem Zusammenhang für eine signifikante Reduzierung der durch diese Prozesse herbeigeführten Emissionen sorgen (vgl. Müller, Loster, Volk, & Schultmann, 2018, S. 1). Die Maximierung der Energieeffizienz ist damit für die Produktionsabteilung vieler Unternehmen sowohl aus ökonomischer als auch ökologischer Perspektive eine der wichtigsten Zielsetzungen geworden. Als Maximierung der Energieeffizienz kann dabei prinzipiell die Optimierung des Verhältnisses von quantitativem bzw. qualitativem Produktions-Output zur dafür verwendeten Energie verstanden werden (vgl. Herrmann & Thiede, 2009, S. 2).

## **2.5 Eingrenzung des Produktionscharakters**

Im Hinblick auf die im Abschnitt 3.4 beschriebene Simulation wird im folgenden Teil näher auf den für die Diplomarbeit relevanten Produktionscharakter verschiedener Unternehmen eingegangen.

Der Produktionscharakter kann grundsätzlich, wie in Abbildung 14 zu sehen ist, durch zahlreiche Merkmale beschrieben und charakterisiert werden. Die Tiefe der Produktstruktur gibt hierbei anfänglich Aufschluss über die Anzahl der Strukturstufen in der gesamten Lieferkette und ist damit auch als ein Maß für die Komplexität im Bereich der Planung und Steuerung zu verstehen. Je mehr Strukturstufen dabei vorzufinden sind, desto komplexer wird der Erfahrung nach das Gesamtsystem (vgl. Schönsleben, 2016, S. 189). Betrachtet man die Ausrichtung der Produktstruktur, so wird im

Allgemeines zwischen konvergierendem und divergierendem Aufbau unterschieden. Die konvergierende Produktstruktur, oftmals auch als diskrete Produktion bezeichnet, steht für die Herstellung von eindeutig getrennten Artikeln wie z.B. Maschinen oder Apparaten. Kennzeichnend für sie ist die Produktion von Stückgut. Die divergierende Produktstruktur hingegen beschreibt den Charakter einer kontinuierlichen Produktion und findet vor allem in der Prozessindustrie ihre Anwendung. Typische Vertreter dieses Industriezweigs sind die Chemie- bzw. Mineralölindustrie (vgl. Schönsleben, 2016, S. 190). Hinsichtlich des Herstellungsprozesses der beiden Produktstrukturen sind damit klare Unterschiede zu erkennen. Die Erzeugnisse der diskreten Produktion können innerhalb eines Fertigungsschrittes auf unterschiedliche Art und Weise verarbeitet werden, während die Produkte der divergierenden Struktur innerhalb einer Charge das gleiche Eigenschaftsprofil aufweisen müssen. Im Gegensatz zur Prozessfertigung besteht für die diskrete Produktion damit die Möglichkeit gewisse Bearbeitungsschritte zu vertauschen (vgl. Mersch et al., 2011, S. 8ff).

| Merkmalsbezug: Kunde und Artikel |                      |                         |                                         |                               |
|----------------------------------|----------------------|-------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------|
| Merkmale                         | Ausprägungen         |                         |                                         |                               |
| Tiefe der Produktstruktur        | viele Strukturstufen |                         | einige Strukturstufen                   | 1-stufige Produktion          |
| Ausrichtung der Produktstruktur  | konvergierend        |                         | Kombination obere/untere Strukturstufen | divergierend                  |
| Frequenz der Kundenanfrage       | einmalig             | blockweise (sporadisch) | regulär                                 | gleichmässig (kontinuierlich) |

| Merkmalsbezug: Logistik- und Produktionsressourcen |                                                                        |                                           |                                                               |                                                     |
|----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Merkmale                                           | Ausprägungen                                                           |                                           |                                                               |                                                     |
| Produktionsumgebung                                | „engineer-to-order“                                                    | „make-to-order“                           | „assemble-to-order“ (ausgehend von Einzelteilen)              | „assemble-to-order“ (ausgehend von Baugruppen)      |
| Tiefe der Produktstruktur im Unternehmen           | viele Strukturstufen                                                   | wenige Strukturstufen                     | 1-stufige Produktion                                          | Handel, (inkl. externe Produktion)                  |
| Anlagenlayout                                      | Fixpositions-layout für die Baustellen-, Projekt- oder Inselproduktion | Prozesslayout für die Werkstattproduktion | Produktlayout für die einzelstückorientierte Linienproduktion | Produktlayout für die hochvolumige Linienproduktion |

Abbildung 14: Mögliche Merkmale und Ausprägungen der Produktion eines Unternehmens (in Anlehnung an Schönsleben, 2016, S.190/194)

Bezogen auf die Logistik- und Produktionsressourcen kann auch die sog. Produktionsumgebung in verschiedene Kategorien unterteilt werden. „Engineer-to-order“ bedeutet dabei, dass sich die für den Kundenauftrag benötigten Teile nicht auf Lager befinden und vor der eigentlichen Herstellung noch die Entwicklungsabteilungen durchlaufen müssen. „Make-to-order“ hingegen beschreibt ein System, in dem von einer abgeschlossenen Konstruktion und Produktionsprozessentwicklung ausgegangen wird. Das Rohmaterial ist in diesem Fall bereits auf Lager oder wird nach dem Auftragseingang direkt beim Lieferanten bestellt. Als weitere Kategorie umfasst „assemble-to-order“ sowohl die Bevorratung auf Ebene der Einzelteile bzw. Baugruppen als auch die kundenspezifische Vormontage oder Montage. Im Falle des „make-to-Stock“-Ansatzes kann, wie der Name bereits vermuten lässt, davon ausgegangen werden, dass sich die Endprodukte zur Zeit des Kundenauftrags bereits auf Lager befinden und folglich nur noch ausgeliefert werden müssen (vgl. Schönsleben, 2016, S. 195).

Wie bereits erwähnt, konzentriert sich die Simulation im Abschnitt 3.4 auf eine bestimmte, real existierende Ausprägung eines Produktionsunternehmens. Dieses Unternehmen wird durch die „Pilotfabrik Industrie 4.0“ der Technischen Universität Wien repräsentiert. Im Fokus der Produktion steht die Herstellung eines 3D-Druckers. Die Ausrichtung der Produktstruktur ist dabei logischerweise konvergierend bzw. diskret und verfolgt in der angewendeten Produktionsumgebung den „make-to-order“-Ansatz. Zur besseren Übersicht wurden die zur „Pilotfabrik Industrie 4.0“ passenden Merkmalsausprägungen gelb hinterlegt. Im Laufe der durchgeführten Simulation kann die Produktionsumgebung bewusst verändert werden. Eine deutlich detailliertere Beschreibung dazu folgt in Abschnitt 3.4.

### 3 State-of-the-Art Analyse und Simulation

#### 3.1 Hintergrund zur Vorgehensweise

Um die erörterten Forschungsfragen der Diplomarbeit und die damit verbundenen Zielstellungen zu erfüllen, wurde in Bezug auf die folgenden Abschnitte eine systematische Literaturanalyse durchgeführt. Diese Analyse soll zuerst Aufschluss darüber geben, welche Anforderungen aktuell an Systeme gestellt werden, die auf Basis erneuerbarer, dezentral implementierter Energieerzeugungsanlagen beabsichtigen das Energiemanagement (EM) eines Unternehmens mit dessen Produktionsplanung und -steuerung (PPS) zu verknüpfen. Im Anschluss daran wird anhand der ausgewählten Literatur untersucht, welche Ansätze und Konzepte zur Kombination dieser EM/PPS-Systeme aktuell bestehen und ob sich gewisse Erfolgsmodelle bereits bewähren konnten.

Ausgangspunkt der systematischen Literaturrecherche war die durch den Verlag Elsevier betriebene wissenschaftliche Datenbank ScienceDirect®. Mittels zahlreicher Kombinationen der in Tabelle 3 aufgeführten Suchbegriffe wurden zur Thematik passende Werke ausgewählt und untersucht. Aufgrund des jungen und dynamischen Charakters des Forschungsfeldes wurde zusätzlich darauf geachtet, ausschließlich Literatur ab dem Jahre 2011 in die Analysen einfließen zu lassen. Teile der gewonnenen Erkenntnisse wurden sukzessive in eine sogenannte *Concept Map* übertragen, um die aus diversen Werken gewonnenen Informationen ganzheitlich und übersichtlich darstellen zu können. Des Weiteren lässt diese Darstellung schnell erkennen, mit welcher Genauigkeit und Tiefe die Informationen auf gewissen Gebieten zur Verfügung stehen. Die *Concept Map* selbst ist im Abschnitt 3.2 nochmal gesondert dargestellt. Im

| Suchbegriffe       |                       |                           |       |
|--------------------|-----------------------|---------------------------|-------|
| energy efficiency  | production planning   | manufacturing system      | wind  |
| energy management  | production control    | sustainable               | solar |
| energy flexibility | production management | sustainable manufacturing | PV    |
| energy planning    | volatile energy       | sustainable industry      | ERP   |
| energy storage     | self-energy supply    | simulation                | MES   |
| decentral energy   | flexible production   | supply                    | PPC   |
| renewable energy   | on-site generation    | demand                    | SME   |

Tabelle 3: Verwendete Suchbegriffe der Literaturrecherche

Anschluss daran stellt Abschnitt 3.3, aufbauend auf die *Concept Map*, verschiedene Lösungsansätze und -konzepte zur Beantwortung der Forschungsfragen vor. Allgemein ist die genaue Aufteilung und Herkunft der Literatur in Tabelle 4 nachzuvollziehen. Im Kern stützt sich die Literaturrecherche grundsätzlich auf 46 Papers aus 12 verschiedenen Journals. Unterdessen konnte der Kreis der untersuchten Literatur während der Analyse der Journals auf Konferenzberichte, Magazine und Bücher erweitert werden. Grund dafür waren spezielle Verweise auf relevante Werke in den Literaturverzeichnissen der ursprünglich ausgewählten Journals. Ein Großteil der Bücher konnte hierbei unter Verwendung des Studentenzugangs der Technischen Universität Wien in der wissenschaftlichen Datenbank SpringerLink® des Springer-Verlags eingesehen werden.

| Typ                    | Name                                                                              | Anzahl |
|------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|--------|
| Journals               | Procedia CIRP                                                                     | 24     |
|                        | Journal of Cleaner Production                                                     | 4      |
|                        | Procedia Manufacturing                                                            | 4      |
|                        | ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb                                | 4      |
|                        | CIRP Annals                                                                       | 3      |
|                        | Applied Energy                                                                    | 1      |
|                        | CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology                              | 1      |
|                        | Computer Science - Research and Development                                       | 1      |
|                        | Computers & Chemical Engineering                                                  | 1      |
|                        | Renewable and Sustainable Energy Reviews                                          | 1      |
|                        | Robotic and Computer-Integrated Manufacturing                                     | 1      |
|                        | International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology | 1      |
| Conference Proceedings | 13. Symposium Energieinnovation                                                   | 1      |
| Magazines              | ew-Magazin                                                                        | 1      |
|                        |                                                                                   | 48     |

Tabelle 4: Ursprung und Aufteilung der Kernliteratur

## **3.2 Anforderungen an kombiniertes EM/PPS-Systeme auf Basis erneuerbarer, dezentraler Energieerzeugung**

Im folgenden Teil erfolgt die systematische Darstellung der Ergebnisse der oben beschriebenen Literaturanalyse. Im Zuge dieser Analyse wurden die aus den verschiedenen Werken gewonnenen Erkenntnisse sukzessive in eine *Concept Map* (vgl. Abbildung 18) übertragen. Die Anforderungen an kombinierte EM/PPS-Systeme können auf diesem Wege sehr übersichtlich und ganzheitlich dargestellt werden, während gleichzeitig zu erkennen ist, in welchen Gebieten bereits detaillierte Informationen zur Verfügung stehen und welche Bereiche durch die betrachtete Literatur bis dato weniger abgedeckt wurden.

Bei der Implementierung eines Energiemanagementsystems in einem Unternehmen ist davon auszugehen, dass zahlreiche Repräsentanten aus diversen Unternehmensbereichen wie z.B. dem Produktionsmanagement, dem Umweltmanagement oder der Ingenieurstechnik an der Planung und Umsetzung mitwirken. Aufgrund dieser Tatsache ist folglich zu erwarten, dass die Zielvorstellungen der involvierten Parteien hinsichtlich des Faktors Energie von abweichenden Prioritäten geprägt sind. Eine konkrete und konsistente Definition der Anforderungen an das angehende Energiemanagementsystem ist dabei von essentieller Bedeutung für dessen erfolgreiche Einbindung in ein Unternehmen (vgl. Franz et al., 2017, S. 7).

### **Zielkonflikt logistischer Zielgrößen**

Der Zielkonflikt zwischen den klassischen logistischen Zielgrößen ist eine der großen Herausforderung für die energieflexible Produktionsplanung und -steuerung. Dieser Konflikt resultiert prinzipiell aus dem gleichzeitigen Streben nach hoher Liefertermintreue, hoher und gleichförmiger Kapazitätsauslastung, geringen Durchlaufzeiten, niedrigen Lagerbeständen und hoher Flexibilität in der Produktion. All diese Zielgrößen unter hoher Wirtschaftlichkeit optimal auszulegen, ist jedoch aufgrund ihrer gegenläufigen Charaktere nicht möglich. Erweitert man dieses System nun um ein volatiles Energieangebot, muss ein weiterer Faktor im besagten Zielkonflikt berücksichtigt werden (vgl. Schuh, Prote, & Luckert, 2017, S. 1). Folglich entsteht für die Produktionsplanung und -steuerung die Anforderung, die angesprochenen Zielgrößen unter zusätzlicher Berücksichtigung der flexiblen Energiegrößen wirtschaftlich abzugleichen (vgl. Atabay, Dornmair, Hamacher, Keller, & Reinhart, 2014, S. 4). Sobottka et al.

präzisieren in diesem Zusammenhang, dass aus Sicht der Planung zukünftig erwartet wird, sowohl die ökonomischen Ziele als auch die energie- und ressourcenbezogene Effizienz zu berücksichtigen (vgl. Sobottka, Kamhuber, & Sihn, 2017b, S. 2). Hermann et al. fügt in diesem Kontext ferner hinzu, dass auch die Umweltverträglichkeit der Energieeffizienz nicht außer Acht gelassen werden sollte (Herrmann, Thiede, Kara, & Hesselbach, 2011).

### **Transparenz und Messbarkeit**

Um die Energie nun als weiteren Parameter in die Produktionsplanung und -steuerung zu integrieren, ist es von Nöten eine entsprechende Transparenz hinsichtlich der Energienachfrage und der energieverbundenen Ausgaben zu schaffen (vgl. Keller, Schultz, Braunreuther, & Reinhart, 2016, S. 2). Gleichzeitig sollte in Energiemanagementsystemen aber auch das zur Verfügung stehende Energieangebot möglichst durchsichtig gestalten werden. Dies kann dem Produktionssystem eines Unternehmens dabei helfen klare Anhaltspunkte im Bereich der Energieeffizienz zu errechnen (vgl. Franz et al., 2017, S. 7). Teiwes et al. beschreiben die Transparenz und Messbarkeit überdies als zwei der wichtigsten Anforderungen im Kontext der energetischen Weiterentwicklung von Fertigungssystemen. Ihren Ausführungen zufolge fungiert die Transparenz als Basis für die ganzheitliche Identifizierung hoher Einsparpotenziale und begünstigt auf diese Weise die Energieeffizienz auf allen Fertigungsebenen. Verwirklicht wird diese Transparenz durch die Erfassung detaillierter Informationen über den Produktionsprozess. Ein Beispiel dafür ist die präzise Aufzeichnung elektrischer Lastprofile von Produktionsmaschinen (vgl. Teiwes, Blume, & Herrmann, 2018, S. 1). Um diese Datengrundlage initial zu schaffen und fortlaufend zu verbessern, ist laut Popp et al. ein stärkerer Fokus auf Energie-Messsysteme von Nöten. Auf lange Sicht wird es diesbezüglich aufgrund des zunehmenden Einsatzes und der sinkenden Messtechnik-Kosten möglich sein, die gewünschten Daten mit immer höherer Auflösung auszulesen. Begründet durch diese Tatsache eröffnen sich für Unternehmen deutlich größere Handlungsfelder hinsichtlich der potenziellen energetischen Effizienzmaßnahmen und damit der ökonomischen Verbesserungsmöglichkeiten (vgl. Popp et al., 2015, S. 2). Unterdessen können anhand der besagten Messungen nicht nur Lastprofile ausgewertet, sondern auch Vorhersagemodelle bezüglich des zukünftigen Energiebedarfs entwickelt werden. Das dadurch entstehende Wissen über direkte, bilaterale Verbindungen zwischen diskreten Produktionsdaten und den dazugehörigen Lastkurven sind laut

Rackow et al. eine unabdingbare Grundlage für die erfolgreiche Umsetzung der energieflexiblen Produktion (vgl. Rackow, Kohl, & Canzaniello, 2015, S. 6).

### **Solide Datenbasis**

Eng verbunden mit der eben beschriebenen Transparenz ist die Schaffung einer soliden Datenbasis im Unternehmen, die ebenfalls als wesentliche Anforderung an kombinierte EM/PPS-Systeme zu verstehen ist. Weinert et al. behaupten hierzu, dass Entscheidungen, die den Energieverbrauch eines Produktionssystems beeinflussen, in allen Phasen eines Fabriklebenszyklus, von der Planung bis zur Durchführung, zu finden sind. Aus diesem Grund ist es den Autoren zufolge von Nöten, die dazugehörigen Daten in generisch, einheitlicher Form bereits ab der Entwurfsphase verfügbar zu machen (vgl. Weinert, Chiotellis, & Seliger, 2011, S. 1). Um ein Produktionssystem in seiner Gänze zu verstehen, besteht Herrmann und Thiede zufolge die Notwendigkeit, alle charakteristischen technischen und organisatorischen Prozessdaten zu analysieren. Dies umfasst sowohl Informationen über die Fertigungsmaschinen selbst (z.B. Durchlaufzeiten und Verfügbarkeiten) als auch über Managementaufgaben wie die Produktionsprogrammplanung (vgl. Herrmann & Thiede, 2009, S. 5). Ferner präzisiert Kerkhoff dazu folgende allgemeine Anforderungen an die energieorientierte Datenbasis eines Betriebs (vgl. Kerkhoff, 2015, S. 3):

- maschinenbezogene Energiedatenerfassung
- intelligente Stromzähler (Smart Meter)
- produktspezifische Lastprofile
- Datenverfügbarkeit in Echtzeit und Statusinformationen aus der Produktion
- umfassende Stammdatenbasis

Wie im Abschnitt 2.4 bereits verdeutlicht wurde, wird die Produktionsplanung und -steuerung üblicherweise durch computerbasierte Systeme unterstützt, welche neben ihrer Planungsfunktion auch dafür genutzt werden, die akquirierten Daten zu speichern und zu kommunizieren (vgl. Keller & Reinhart, 2016, S. 2). Gemäß Bunse et al. sind diese, allgemein als *Information and Communication Technologies* (ICT) bekannten, Systeme wichtige Wegbereiter im Feld der energieeffizienten Fertigung. ICT helfen dabei den Energieverbrauch des Fertigungsprozesses zu verwalten und zu reduzieren. Gleichzeitig unterstützen sie die Steuerung der Produktionsprozesse und eröffnen Möglichkeiten der Evaluation potenzieller Investitionen hinsichtlich bestimmter

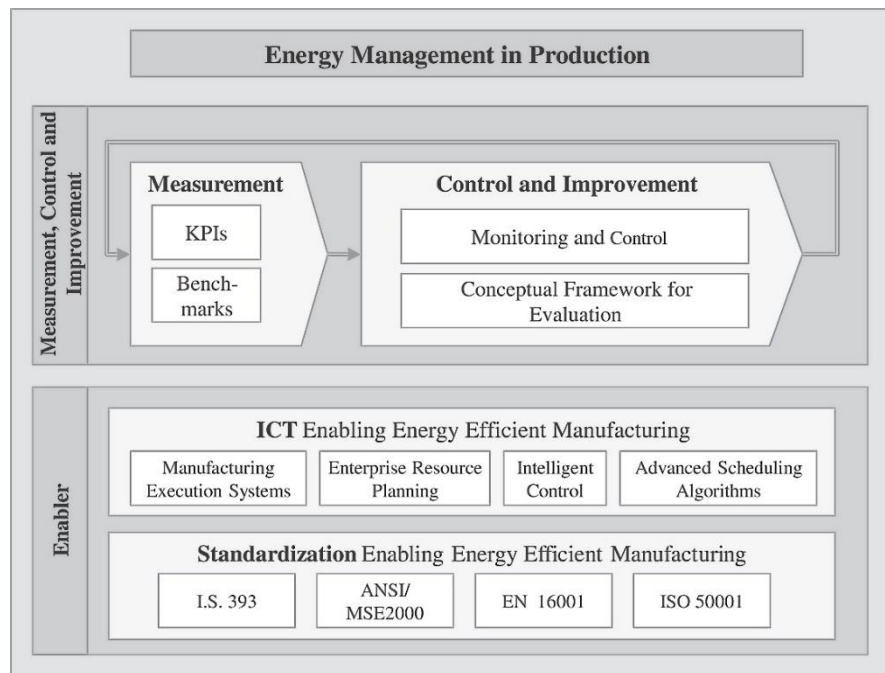
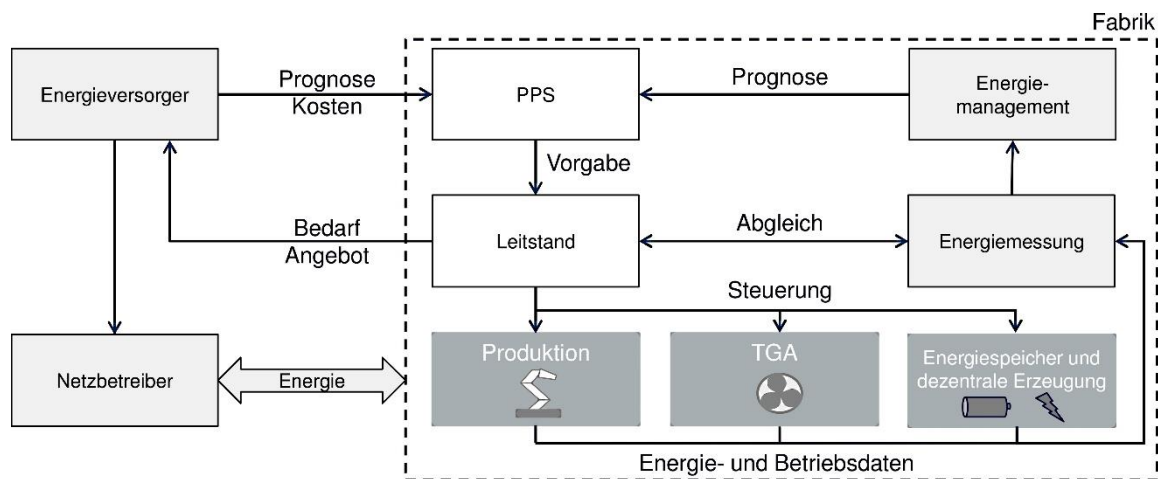


Abbildung 15: ICT als Wegbereiter im Energiemanagement (Bunse, Vodicka, & Schönsleben, 2011, S. 4)

Energiesparmaßnahmen. Ihre tragende Rolle in der Weiterentwicklung der Energieeffizienz trägt nicht zuletzt zur Senkung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes bei. In Abbildung 15 kann deren Rolle als treibende Kraft für Messtechnik und Produktionssteuerung im Energiemanagement anschaulich nachvollzogen werden. Aufgrund ihrer Nähe zum Fertigungsprozess sind hier aus Sicht der PPS vor allem das ERP und die MES von großem Interesse (vgl. Bunse, Vodicka, & Schönsleben, 2011, S. 4ff). Die ICT-unterstützte Datenanalyse in Energiemanagementsystemen ist laut May et al. auch deshalb von so großer Bedeutung, weil es der obersten Führungsebene eines Unternehmens die Chance gibt, die energierelevanten Prozesse und die damit verbundene Effizienz besser zu verstehen und dementsprechend aktiv zu betreuen (vgl. May et al., 2017, S. 13). Im Zuge dessen fordern Bunse et al. eine Entwicklung von universellen Informationsplattformen zur besseren und verständlicheren Visualisierung diverser Fertigungsprozesse (vgl. Bunse et al., 2011, S. 9).

### Berücksichtigung energierelevanter Strukturen

Die Berücksichtigung und Integration aller energierelevanten Strukturen eines Betriebs ist als weitere elementare Anforderung an kombinierte EM/PPS-Systeme festzuhalten und aufgrund dessen auch als gesonderter Ast in der *Concept Map* in Abbildung 18 dargestellt. Laut Atabay et al. eröffnen sich für die Produktionsplanung und -steuerung durch die Integration aller vorhandenen Stromverbraucher und -quellen grundsätzlich



**Abbildung 16:** Zusammenspiel energierelevanter Systeme eines Unternehmens (vgl. Atabay et al., 2014, S. 4f)

neue Handlungsspielräume auf dem Gebiet des Energiemanagements. Aggregierte Daten können hierbei in die Vorhersage der erwarteten Verbräuche einfließen und mit den Informationen über aktuelle Strommarktentwicklungen verknüpft werden. Den Autoren zufolge lassen sich daraus auf Grundlage bestehender Aufträge optimale Produktionspläne entwickeln, die bei Bedarf durch gezielte Schritte modifiziert werden können um auf Störungen oder abweichende Umweltbestimmungen zu reagieren. Wie in Abbildung 16 unter anderem zu erkennen ist, dürfen im Kontext der Berücksichtigung aller energetisch wichtigen Teilbereiche einer Fabrik auch die technische Gebäudeausrüstung (TGA) sowie sämtliche dezentrale Stromerzeugungsanlagen und Stromspeicher nicht außer Acht gelassen werden (vgl. Atabay et al., 2014, S. 4f).

Im Zusammenhang mit ihrer simulationsbasierten Studie zur Integration der Energieeffizienz in die Ziele der PPS betonen Sihn et al. ausdrücklich, dass die simultane Berücksichtigung der energierelevanten Größen sowohl seitens des Materialflusses als auch von Seiten des thermophysikalischen Verhaltens des Energiesystems die anspruchsvollste aller Anforderungen darstellt. Nur über die Interaktion der beiden Teilbereiche könne das auf ideale Fertigungspläne und optimalen Materialeinsatz zurückzuführende Einsparungspotenzial genutzt werden (vgl. Sihn et al., 2018, S. 1). Auch Bazan et al. bestätigen hierzu die Bedeutung der Kombination des Energie- und Materialflusses für die optimale Auslegung von EM/PPS-Systemen (vgl. Bazan, Steber, & German, 2017, S. 2).

## Abstimmung von Energieangebot und -nachfrage

Eine in der untersuchten Literatur sehr zentral erwähnte Anforderung an die systematische Verknüpfung des Energiemanagements mit der PPS ist die optimale Abstimmung von Energieangebot und -nachfrage. Beier et al. erklären dazu einleitend, dass die Kombination der fertigungsseitigen, unelastischen Energienachfrage mit der unkontrollierbaren Stromerzeugung aus Sonne und Wind zu Diskrepanzen innerhalb des Angebot-Nachfrage-Verhältnisses führt (vgl. Abbildung 17). Betrachtet man also die

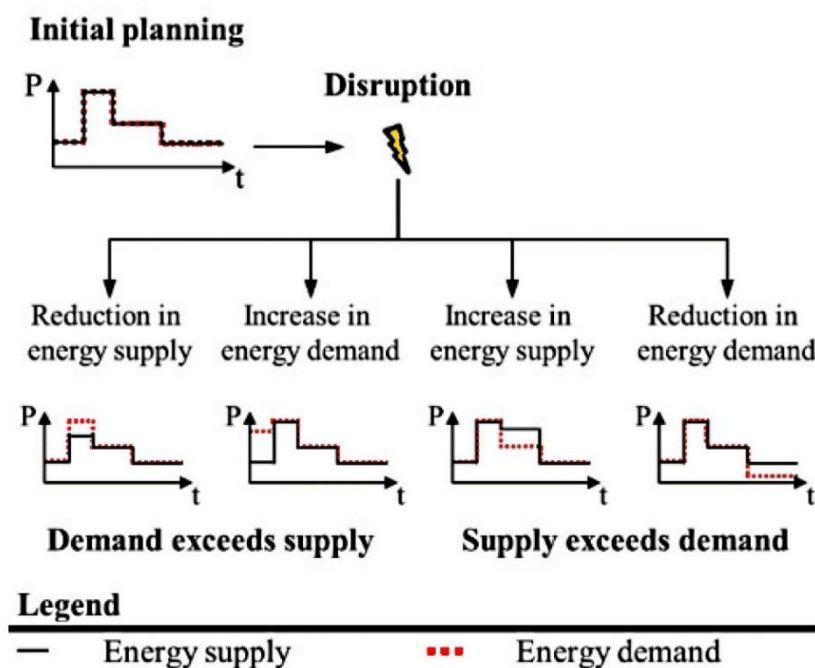


Abbildung 17: Diskrepanzen innerhalb des Angebot-Nachfrage-Verhältnisses (Schultz, Sellmaier, & Reinhart, 2015, S. 3)

stochastische Natur der Energieerzeugung aus volatilen, erneuerbaren Quellen und kombiniert diese mit dem von operativen Einschränkungen geprägten, dynamischen Verhalten heutiger Fertigungssysteme, so ist die Entwicklung einer Strategie zur Koordinierung von Energieangebot und -nachfrage unumgänglich (vgl. Beier et al., 2017, S. 2). Die allgemeine Zielsetzung der energieorientierten Produktionssteuerung ist demnach laut Schultz et al. die Einhaltung der Fertigungstermine bei minimaler Abweichung des realen Energieverbrauchs vom festgelegten Planbedarf. Damit diese Abweichungen nun so gering wie möglich ausfallen, fordern die Autoren die permanente Überwachung der Angebots- und Bedarfsdaten, anhand deren unerwartete Störungen identifiziert und potenzielle Auswirkungen interpretiert werden müssen (vgl. Schultz, Sellmaier, & Reinhart, 2015, S. 3). Um hinsichtlich der angesprochenen Abweichungen

nicht nur reagieren sondern auch vorausschauend agieren zu können, ist es auf Angebotsseite notwendig, möglichst genaue Vorhersagen über die erwartet produzierte Strommenge zu erhalten (vgl. Pechmann & Zarte, 2017, S. 2). Durch das fluktuierende Energieangebot bestimmter regenerativer Energieerzeuger, fügen Matzen und Tesch ferner hinzu, gilt es für die Produktionsplanung neben der Optimierung der Los- und Chargengrößen auch den effektiven Energiebedarf der Lose und Chargen genau zu berücksichtigen. Allgemein führt dies dazu, dass die Komplexität im Hinblick auf die Abstimmung zwischen Produktionsplanung und Energiemanagement erheblich steigt (vgl. Matzen & Tesch, 2017, S. 517).

### **Flexibilität**

Als letzter jedoch nicht minder wichtiger Ast der *Concept Map* wurde die Flexibilität als sehr übergreifende Anforderung an kombinierte EM-PPS-Systeme ausgemacht. Die Flexibilität an sich spielt seit Jahrzehnten eine große Rolle in diversen Fertigungssystemen und ist deswegen für die Mehrheit der Unternehmen kein neuartiges Konzept. Das Streben nach gesteigerter Flexibilität war und ist für produzierende Unternehmen die Antwort auf die fluktuierende Nachfrageentwicklungen seitens der Kunden. Dabei sehen sich die Betriebe heutzutage mit steigenden Zahlen an individualisierten Produkten, Produktvarianten und Produktinnovationen konfrontiert, während die Produktlebensdauer laufend abnimmt. Gegenwärtig erfährt das Konzept der Flexibilität eine zusätzliche Erweiterung um den Aspekt ihrer Anwendung im Bereich der energieorientierten Angebots- und Nachfrageregulierung. Im Gegensatz zu den eben erwähnten bisherigen Treibern der Flexibilität, ist die Energieflexibilität hingegen kein spezielles Kundenbedürfnis, sondern eine klare Anforderung an ein sich entwickelndes Energiesystem, das mit einem zunehmenden Anteil an volatilen und dezentralen Energiequellen umzugehen hat (vgl. Weeber, Lehmann, & Böhner, 2017, S. 1f).

Den Ausführungen von Unterberger et al. zufolge definiert sich die Energieflexibilität grundsätzlich als Fähigkeit eines Systems, seine Energienachfrage einem sich ändernden Energieangebot anzupassen (vgl. Unterberger, Eisenreich, & Reinhart, 2018, S. 1). Im Gegensatz zur Energieeffizienz kann die Energieflexibilität aber nicht auf ein statisches Problem reduziert werden und ist von sehr dynamischem Verhalten geprägt. Aufgrund dessen kann die Gestaltung energieflexibler Produktionssysteme von Unternehmen zu Unternehmen sehr unterschiedlich ausfallen (vgl. Unterberger, Eisenreich, & Reinhart, 2018, S. 3).

Weckmann et al. klassifizieren und präzisieren die Anforderungen und die damit verbundenen Ansätze an energieflexible Produktionsstrukturen in ihrer Studie zur Steuerung dezentraler Energiesysteme gemäß folgender Mittel. Einerseits soll durch das temporäre Anhalten der Produktion die Möglichkeit eröffnet werden, auf ein suboptimales Energieangebot reagieren zu können. Andererseits ist es den Autoren zufolge denkbar, die Lagerbestände der jeweiligen Energiesituation anzugleichen und beispielsweise in Zeiten überdurchschnittlich guter Stromversorgung auf Lager zu produzieren. Des Weiteren kann über das Angleichen bestimmter Prozessparameter der Energieverbrauch der Produktion wahlweise erhöht oder gesenkt werden. Zusätzlich sei es denkbar, Instandhaltungs- und Rüstvorgänge energiesensibel anzulegen, um die Energiekosten der Produktion zu senken (vgl. Weckmann et al., 2017, S. 2). Popp et al. beschreiben in diesem Zusammenhang jedoch auch, dass für die ökonomische Flexibilisierung der Produktion neben den energierelevanten Themen auch Einflüsse auf die Produktivität und Prozessstabilität bedacht werden müssen. So birgt beispielsweise die direkte Beeinflussung des aktuellen Leistungsbedarfs einer Maschine ein deutlich größeres Risiko als die reine organisatorische Abänderung der Lastgänge. Da der Leistungsbedarf einer Anlage von den Zuständen ihrer einzelnen Komponenten abhängt, kann seine Variation die ordnungsgemäße Funktion der Prozesse gefährden. Aus diesem Grund betonen Popp et al. zusammenfassend, dass im Zuge einer produktivitätserhaltenden Energieflexibilisierung von Produktionsanlagen keine negativen Auswirkungen auf die Prozesssicherheit toleriert werden dürfen (vgl. Popp et al., 2015, S. 3).

Auf folgender Seite sind die sukzessiv erarbeiteten Ergebnisse der Literaturrecherche zu den Anforderungen an kombinierte EM/PPS-System in der bereits erwähnten *Concept Map* dargestellt. Die erworbenen Resultate konnten in sechs verschiedene Themenbereiche unterteilt und auf einer tieferen Ebene präzisiert werden. Außerdem war während der Literaturrecherche wiederholt festzustellen, dass die einzelnen Ergebnisbereiche oftmals von starken gegenseitigen Abhängigkeiten geprägt und nicht immer klar voneinander abzugrenzen sind. In Abbildung 18 ist dies durch die gepunkteten Doppelpfeile angedeutet.

Vor dem Hintergrund der Ausführungen dieses Kapitels können abschließend mit Thiede zwei allgemeine und themenübergreifende Anforderungen an das energieorientierte Produktionsmanagement erwähnt werden. Zum einen sollte die

Energieeffizienz weniger als zusätzlicher, sondern integrativer Ansatz verstanden werden, der eine gleichwertige Perspektive auf alle zeit-, kosten-, qualitäts- und energiebezogenen Ziele bietet. Zum anderen sollte die ohnehin komplexe Thematik der Energieflüsse in der Produktion nach dem Motto „Complex tasks, simple tools“ mit möglichst einfachen Mitteln bewältigt werden (vgl. Thiede, 2012, S. 36).

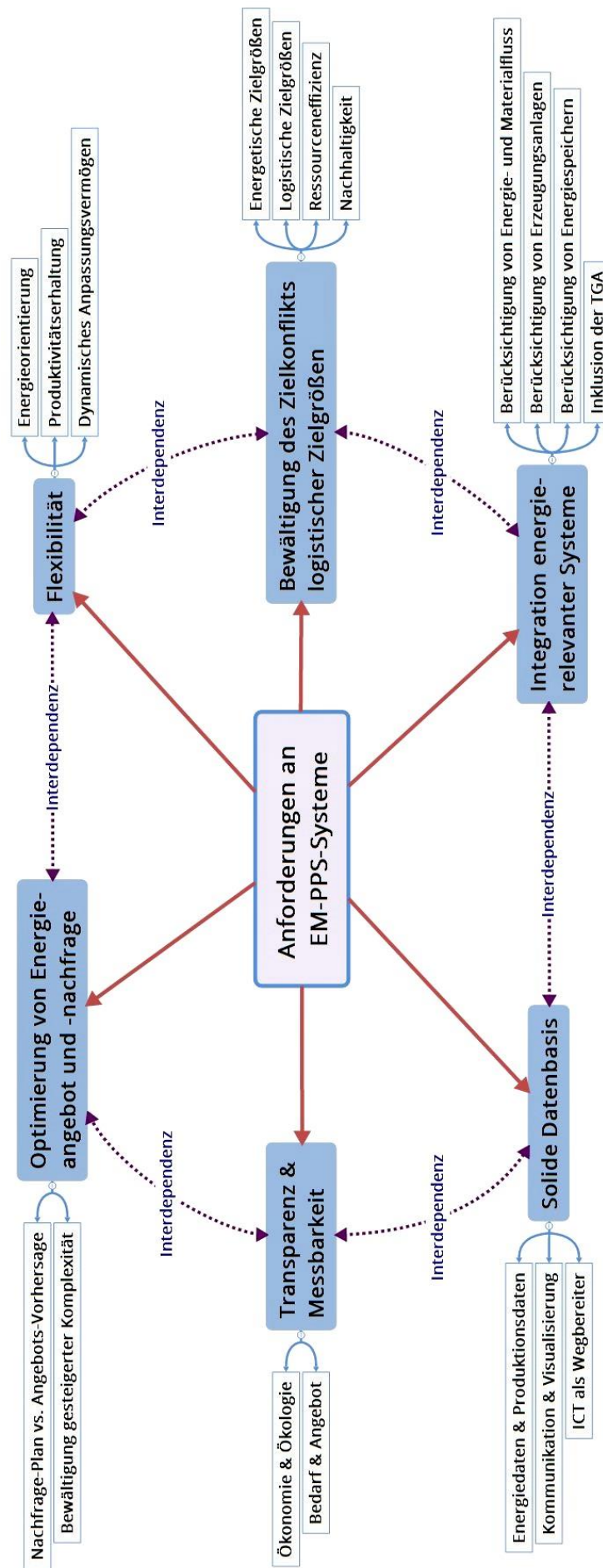


Abbildung 18: Concept Map zu den Anforderungen an kombinierte EM/PPS-Systeme

### **3.3 Lösungsansätze und -konzepte für kombinierte EM/PPS-Systeme auf Basis erneuerbarer, dezentraler Energieerzeugung**

#### **3.3.1 Ökonomisch orientierte Optimierungskonzepte**

##### **EnergyBlocks-Methodik**

Ein in der betrachteten Literatur mehrfach zitiertes Konzept zur akkuraten Vorhersage und Planung des Energiebedarfs von Produktionsprozessen ist die sogenannte EnergyBlock-Methode von Weinert. Diese wurde dazu entwickelt, die Kriterien der Energieeffizienz und -effektivität in die Produktionsplanung und -steuerung zu integrieren und dabei alle Ebenen, von den einzelnen Maschinenteilen bis hin zu bereichsübergreifenden Wertschöpfungsnetzen, zu umfassen. Basierend auf der Ermittlung des Energieverbrauchs der verschiedenen Produktionsanlagen orientiert sich die Methodik grundsätzlich an den unterschiedlichen Betriebszuständen der im Fokus stehenden Maschinen. Infolge dieser dynamischen Zustände zeigen sich variable Energieverbrauchsmuster, die über die Zeit als Lastprofile identifiziert werden können. Ausschlaggebend für den schwankenden Verbrauch der Anlagen sind dabei diverse Prozessparameter deren Auswirkungen zwar einerseits einzigartig sind, andererseits aber auch reproduziert werden können. Ordnet man also die Betriebszustände dem zeitlich variablen Verbrauchsprofil zu, so entsteht eine Sequenz von „Energieblöcken“, die unter Aneinanderreihung den gesamten Verlauf des Produktionsprozesses widerspiegelt und gleichzeitig sowohl Aufschluss über die benötigte Leistung als auch die Dauer der einzelnen Zustände gibt. Um im nächsten Schritt ein komplettes Produktionsprogramm mittels EnergyBlocks modellieren zu können, ist eine umfassende Datenbank dieser Energiepakete von Nöten. Dazu können die Informationen neben der direkten Messung des Energieverbrauchs der individuellen Anlagen auch über Referenzprozesse, die annähernd analoge Prozessparameter und Maschinenspezifikationen besitzen, abgeleitet werden (vgl. Weinert et al., 2011, S. 1f).

Nachdem jedem produktspezifischen Prozess ein EnergyBlock zugeordnet wurde, ist es Aufgabe der Produktionsplanung die darüber entwickelten Segmente bestimmten Maschinen zuzuweisen und somit ein komplettes Produktionsprogramm zu schaffen. Die Entscheidung über die genaue Sequenz der Energie-Bausteine lässt sich seitens

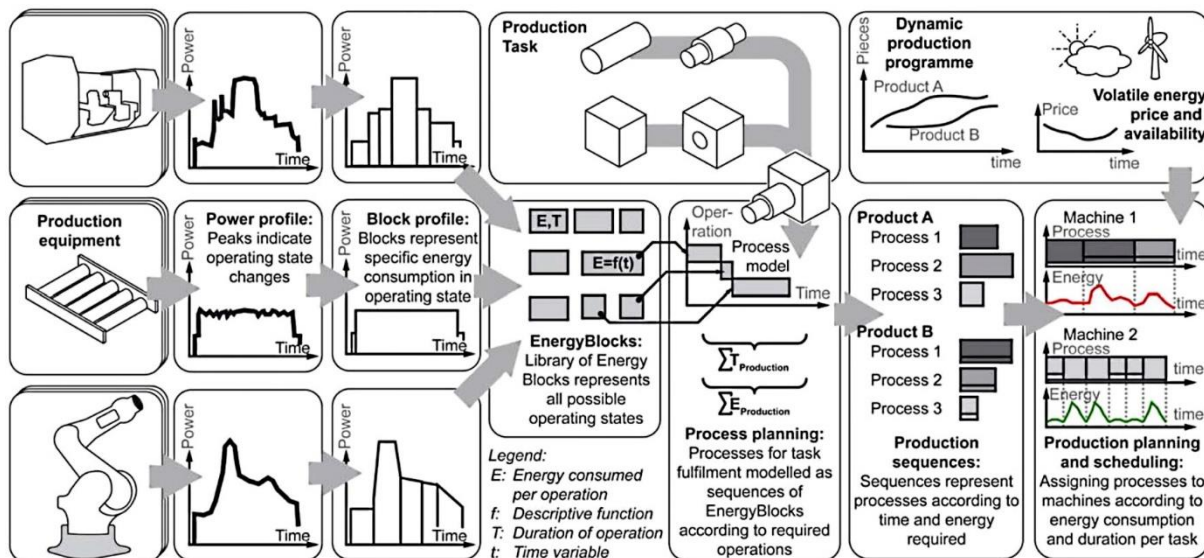


Abbildung 19: Die EnergyBlocks Methodik (Weinert et al., 2011, S. 2)

der PPS flexibel unter Berücksichtigung des Energiepreises und des zur Verfügung stehenden Energieangebots aus volatilen, erneuerbaren Energiequellen fallen (vgl. Abbildung 19). Ferner präzisieren Keller und Reinhart, dass der Ansatz der Vorhersage des zukünftigen Energiebedarfs bestimmter Produktionsaufträge dazu genutzt werden kann, die Energienachfrage einer Fabrik in das ERP aufzunehmen und damit besser zu beschreiben. Den Autoren zufolge beinhaltet das ERP bereits spezifische Informationen über Produkte, Prozesse und Maschinen. Es lässt sich deswegen problemlos mit Energiedaten bereichern (vgl. Keller & Reinhart, 2016, S. 3).

Um im Kontext der Methodik der EnergyBlocks effizient mit einer Vielzahl an Produktionsanlagen verfahren zu können, betonen Schmidt et al., dass der betriebene Messaufwand so gering wie möglich gestaltet werden sollte, ohne die Datengenauigkeit unter einen Wert von 80% fallen zu lassen. Dazu liefern die Autoren einen detaillierten Entscheidungsbaum, der dabei hilft, sämtliche Maschinen unter geringstem Aufwand in vier unterschiedliche Energieverbrauchsgruppen zu klassifizieren. Die Kategorisierung der Anlagen erfolgt dabei anhand feststehender bzw. variabler Prozessparameter. Da die Vorhersage des Energieverbrauchs nun sehr stark von der Klassifizierung der Maschinen abhängt, ist der Entscheidungsbaum laut Schmidt et al. als zentrales Werkzeug für die energieorientierte Produktionsplanung anzusehen (vgl. Schmidt, Li, & Thiede, 2015, S. 3f).

Zukünftiges Entwicklungsziel der EnergyBlock-Methodik ist es laut Weinert et al. auch, dem Trend der zunehmenden Automatisierung zu folgen und eine Schnittstelle zu überwachenden Sensornetzwerken herzustellen. Die Kombination aus Echtzeit-Verbrauchsdaten und integrierten Planungsalgorithmen erlaube zukünftig die automatisierte Anpassung des aktuellen Produktionsplans (vgl. Weinert et al., 2011, S. 4).

### **Datengrundlage und Informationssysteme der energieorientierten PPS**

Die Komplexität der Planung und Steuerung von energetischen Prozessen verlangt grundsätzlich nach einer Unterstützung durch produktionsnahe Informationssysteme, wie dem ERP und den MES. Die informationstechnologische Modellierung des Energiebedarfs, des aktuellen Energieverbrauchs und nicht zuletzt des Energieangebots formt die Basis für diese unterstützenden IT-Systeme. Einen Ansatz zur Einbindung von Energiedaten in die Informationssysteme der Produktionsplanung und -steuerung bieten die Ausführungen von Keller et al., die in Abbildung 20 übersichtlich nachzuvollziehen sind (vgl. Keller, Schultz, et al., 2016). Da der Bezug von Energie in energieflexiblen Fabriken prinzipiell auf die Produktionsplanung abgestimmt wird, kommuniziert die Planungsabteilung hier über das ERP direkt mit den Energieversorgern, um die kostenoptimalen Lösungen auszuarbeiten. Die daraus resultierenden Produktions- und Energiepläne werden anschließend in Form von spezifischen Werten an die in der Produktionssteuerung enthaltenen MES weitergegeben. Außerdem kann ein MES, beispielsweise über die sog. OPC UA Protokolle, auch aktuelle Energieverbrauchs- oder Vorgangsdaten von verschiedensten Maschinen empfangen und für die Nutzer visuell aufbereiten. Damit ermöglichen es die Manufacturing Execution Systems ihren Benutzern, kurzfristige Modifikationen hinsichtlich des Energieverbrauchs oder der nachgefragten Energiemenge zu tätigen. Betrachtet man die Illustration der Verknüpfung von ERP und MES so ist zu erkennen, dass die beiden Systeme eine gemeinsame Energie-Datenbank teilen. In dieser Datenbank werden alle energierelevanten Informationen der Produktion hinterlegt und sowohl für Planungs- als auch für die Steuerungsaktivitäten zur Verfügung gestellt. Auf Basis dieser Informationen kann nun sowohl die Grob- als auch Feinplanung energetisch sinnvolle Produktionsaufträge platzieren. Während für die Grobplanung die gesamte Energiemenge einer Periode im Fokus der Planungsprozedur liegt, konzentriert sich die Feinplanung mit höherer Auflösung darauf, die konkreten Leistungsbedarfe als Randbedingungen für die PPS festzulegen. Zusammengefasst werden somit sämtliche Produktionsaufträge um den Faktor der Energie erweitert (vgl. Keller, Schultz, et al., 2016, S. 2).

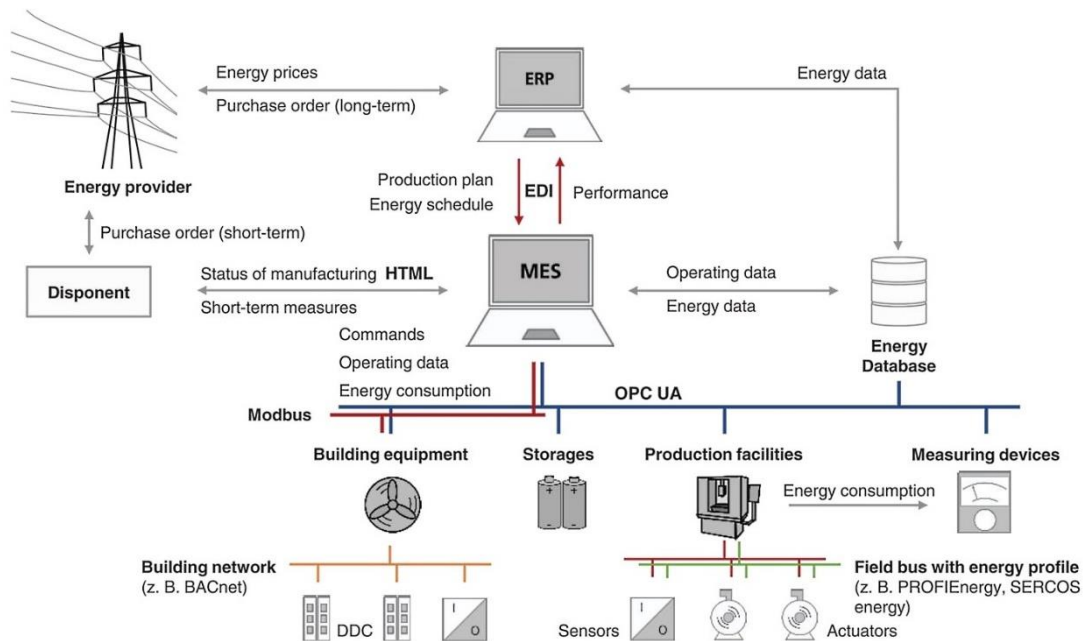


Abbildung 20: Ansatz energieorientierter ERP und MES (Keller, Schultz, et al., 2016, S. 3)

Inwiefern die Erweiterung der Produktionsplanung um den Faktor der Energie im Speziellen aussehen kann, zeigt Abbildung 21. Keller et al. präsentieren darin ein Konzept, das die konventionellen Prozesse der Produktionsplanung im ERP sequenziell und ineinandergreifend um energieorientierte Planungsmodule erweitert. Dabei wird jeder Schritt von der Losgrößenrechnung bis zu Maschinenbelegung berücksichtigt. Angefangen mit den mittelfristig ausgelegten Energiemodulen, dienen die Daten aus gut vorhersehbaren, kontinuierliche Energiequellen vorerst zur allgemeinen Abschätzung des Energiebedarfs des Produktionsvorhabens. Im Anschluss daran ermöglichen die kurzfristig angelegten Energiemodule neben der Integration von dezentralen, erneuerbaren Stromquellen auch die Berücksichtigung zeitweiliger Strommarktentwicklungen. Die aus diesen Inputs generierten Informationen lassen sich nun beispielsweise in die

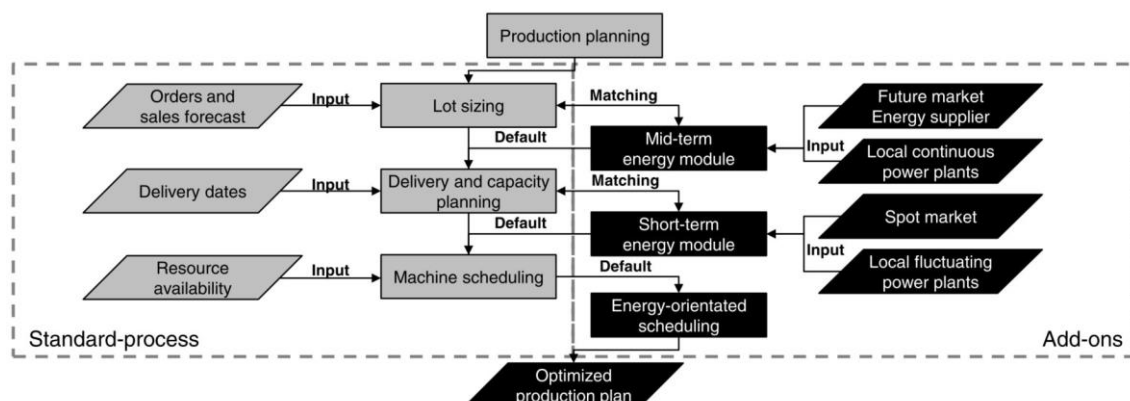


Abbildung 21: Energieoptimierte Produktionsplanung (Keller, Schultz, et al., 2016, S. 4)

Planung der Lieferzeiten oder Kapazitäten aufnehmen. Letztlich wird am Ende dieses ganzheitlichen Planungsprozesses der Produktionssteuerung neben dem Maschinenbelegungsplan auch ein optimierter Energie-Zeitplan übergeben. Anhand dieser Pläne kann die Produktionssteuerung über den vom MES ermittelten Echtzeit-Energieverbrauch wiederholte Soll-Ist-Vergleiche ziehen, die vor allem den Maximal- und Durchschnittsverbrauch der gesamten Produktion im Auge behalten. Bei kritischen Abweichungen, die etwa signifikant höhere Energiekosten nach sich ziehen würden, können unterschiedlich starke Lastmanagementmaßnahmen eingeleitet werden. Dies kann sowohl automatisiert als auch manuell erfolgen (vgl. Keller, Schultz, et al., 2016, S. 3f).

Wie im obigen Absatz bereits kurz erwähnt, gilt es den Autoren Keller und Reinhart zufolge auch das Energieangebot in die Informationssysteme der PPS einzubinden. Prinzipiell muss hierbei zwischen internen, dezentralen und externen, öffentlichen Energieversorgern unterschieden werden. Der effektive Nutzen der Integration definiert sich für das ERP in diesem Kontext sehr stark über den Charakter und den zeitlichen Horizont der Energiequellen. Aus Sicht der Produktionsplanung ist die Integration des öffentlichen, externen Energiemarktes aufgrund der unzählig möglichen Versorgungsmodelle jedoch eine sehr komplexe Variante. Trotz allem kann das öffentliche Versorgungsnetz durch seine kontinuierliche, vorhersehbare Bereitstellung an Energie als wichtiger Input sowohl für die Grob- als auch Feinplanung gesehen werden. Im Kontrast dazu steht die vor-Ort Erzeugung aus erneuerbaren Energiequellen, welche durch ihren volatilen Charakter für die Grobplanung der energieorientierten Produktion nicht in Frage kommt. Nichtsdestotrotz spielt sie auf Basis von Vorhersagemodellen eine wichtige Rolle im Bereich der Feinplanung (vgl. Keller & Reinhart, 2016, S. 4).

### **Energetische Reihenfolgeplanung, Auftragsfreigabe und Leistungsregelung**

Die Aufgaben der Reihenfolgeplanung, der Auftragsfreigabe und der Leistungsregelung gehören zu den grundlegenden Instrumenten der zeitlichen und faktischen Festlegung realer Fertigungsaufträge. Weichen die einzelnen Aufträge im Energieverbrauch von ihren Sollwerten ab, entwickeln auch die besagten Planungsaufgaben einen Effekt auf die Lastprofile der Produktion. Schultz et al. behaupten in diesem Zusammenhang, dass die Berücksichtigung des Energieverbrauchs als Variable dieser Instrumente die aktive Steuerung der Lastabweichungen vom Energieplan ermögliche. Aus diesem Grund präsentieren die Autoren verschiedene Methoden zur Entwicklung einer energieorientierten Produktionssteuerung auf Basis von Reihenfolgeplanung,

Auftragsfreigabe und Leistungsregelung, auf die im folgenden Absatz näher eingegangen wird (vgl. Schultz et al., 2017, S. 3).

Das grundlegende Ziel der energieorientierten Produktionssteuerung ist es Schultz et al. zufolge, die Energiekosten durch möglichst geringe Abweichungen vom festgelegten Energieplan zu reduzieren. Da der Lieferverzug aber generell schwerwiegende Konsequenzen nach sich ziehen kann, bleibt die Termintreue trotz allem das oberste Ziel der Produktionssteuerung. Wie in Abbildung 22 zu erkennen ist, erfolgt im ersten Schritt der vorgeschlagenen Methode eine zentralisierte Auftragsfreigabe gemäß der auf dem geplanten Produktionsstart beruhenden Dringlichkeit der Bestellungen. Um die Durchlaufzeiten so gering wie möglich zu halten, verbleiben die Aufträge dabei bis zum geplanten Startdatum in der Warteschlange. Im nächsten Schritt, der Reihenfolgeplanung, können diese Aufträge nun entweder anhand ihres Lieferdatums oder auf Basis energiebezogener Zielstellungen priorisiert werden. Dazu wird die Schlupfzeitregelung um den Faktor des Energieverbrauchs erweitert. Im Anschluss daran erfolgt im dritten Schritt eine weitere dezentralisierte Auftragsfreigabe, deren Aufgabe es ist die Verfügbarkeit an elektrischer Energie zu überprüfen und bei Bedarf den Start einzelner Produktionsaufträge zu verschieben. Dies geschieht durch einen Algorithmus, der an jeder Arbeitsstation kontrolliert, ob die Freigabe des nächsten Auftrags dazu führen würde, dass der Energieverbrauch den vom Energieplan fixierten Grenzwert überschreitet. Ist dies der Fall, so wird überprüft, ob die verbleibenden Aufträge über

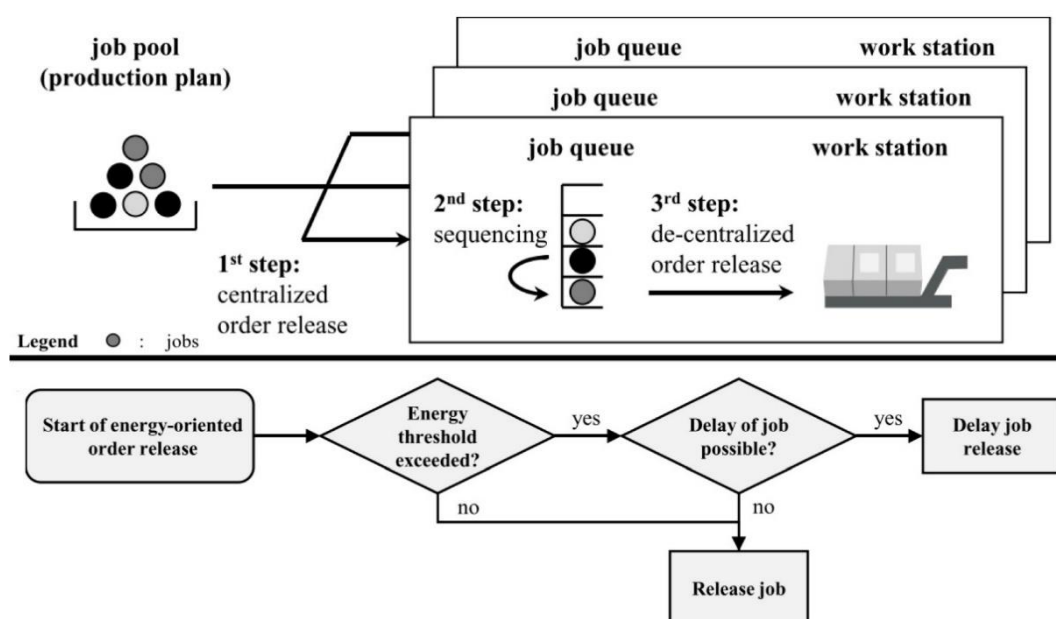


Abbildung 22: Energieorientierte Produktionssteuerung mit Algorithmus zur Auftragsfreigabe (in Anlehnung an Schultz et al., 2017, S. 4f)

genügend Schlupfzeit verfügen, um sie in Zeiten mit höherem Energieangebot zu verschieben. Da die Erfüllung des Lieferdatums durchweg höhere Priorität als die Einhaltung des Energieplans genießt, muss der Auftrag bei drohender Verzögerung oder ausreichend Energieangebot umgehend freigegeben werden. Der beschriebene Algorithmus kann in Abbildung 22 nochmal nachvollzogen werden (vgl. Schultz et al., 2017, S. 4). Komplementär zur energiebezogenen Auftragsfreigabe und Reihenfolgeplanung entwickelten die Autoren eine Methode zur Leistungsregelung, die sich prinzipiell am Auftragsbestand der Produktion orientiert. Das einzige Mittel der energieorientierten Leistungsregelung ist dabei die Mehrarbeit. Übersteigt der periodisch überprüfte Auftragsbestand also einen festen Grenzwert, werden Überstunden für Zeiten mit optimalem Energieangebot oder vorteilhaften Energiepreisen initiiert (vgl. Schultz et al., 2017, S. 5).

### **Energiespeicher, Regelenenergie und Demand-Side-Management (DSM)**

Durch die verstärkte Nutzung fluktuierender Stromerzeuger, wie Photovoltaik- und Windkraftanlagen, entstehen zukünftig immer wieder Überschüsse bzw. Defizite an elektrischer Energie. Die dadurch erzwungenen Abschaltungen bzw. der nötige Netzausbau sind aus volkswirtschaftlicher Sicht unerwünscht und sollten deswegen vermieden werden. Dazu ist es den Autoren Matzen und Tesch zufolge von Nöten, sowohl Kraftwerke als auch Verbraucher wie z.B. Industrieanlagen zu flexibilisieren und Stromspeicher zu implementieren. Werden diese zusätzlich in sogenannte virtuelle Kraftwerke bzw. Smart Grids eingebunden, können Flexibilitätsmärkte wie der Regelenenergiemarkt adressiert und somit reduzierte Energiekosten verwirklicht werden. Das Energiemanagement eines Unternehmens übernimmt dabei eine entscheidende Rolle, da flexible Anlagen in Kombination mit Stromspeichern Netzschwankungen ausgleichen und schlussendlich dafür sorgen, dass der Anteil umweltfreundlicher Erzeugungsanlagen erhöht wird (vgl. Matzen & Tesch, 2017, S. 255).

Zur Integration der volatilen Erzeugungsanlagen und Stromspeichern in die PPS differenzieren Atabay et al. prinzipiell zwischen drei Bereichen, die sich im zeitlichen Horizont ihrer Planungs- und Steuerungsaufgaben unterscheiden. Die erste Kategorie der mittelfristigen Produktionsplanungsverfahren befasst sich mit der Mengenplanung, der Bildung energieorientierten Losgrößen und der Erstellung von Energieschichtplänen. Aufgrund des langen Planungsvorlaufes sind in diesem Bereich aber hauptsächlich kontinuierliche Kraftwerke von Bedeutung. Erzeugungsanlagen mit stark

schwankender Leistung sind zwar über Prognosen im Vorfeld abzuschätzen, können jedoch erst sehr nah am Produktionsstart verlässlich eingeplant werden. Aus diesem Grund sind die volatil erzeugenden Anlagen, wie Wind- und Solarkraftwerke, überwiegend für die anderen zwei Kategorien der kurzfristigen und echtzeitbezogenen Produktionssteuerungsverfahren von Bedeutung. Aufgaben wie die Termin- und Kapazitätsplanung sowie die Auftragsüberwachung stehen hierbei im Vordergrund (vgl. Atabay et al., 2014, S. 6f). Einen sehr ähnlichen Ansatz verfolgen auch Keller et al. mit ihrem Modell zur Einbindung dezentraler Erzeugungsanlagen in die PPS. Der vorgeschlagene Planungsablauf wird in Abbildung 23 nochmals verdeutlicht (vgl. Keller, Braunreuther, et al., 2016, S. 3).

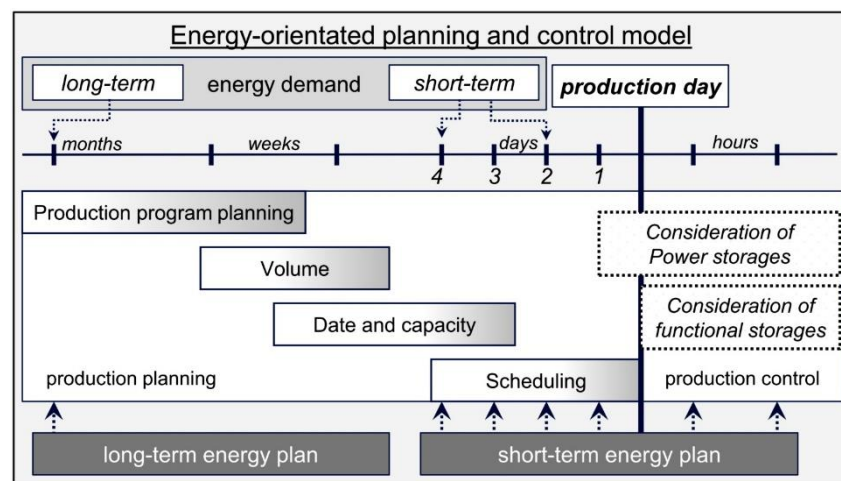


Abbildung 23: Energieorientierte PPS (Keller, Braunreuther, et al., 2016, S. 3)

Da gerade in den gegenwartsnahen Steuerungsbereichen der PPS sehr hohes Potenzial möglicher Lastverschiebungen bzw. Leistungsanpassungen besteht, sind die Stromspeicher, auch unter Berücksichtigung der Teilnahme am Regelenergiemarkt, von großem Nutzen. Dazu betonen Atabay et al., dass bei der Installation von Stromspeichern in Unternehmen die Möglichkeit besteht, vorkommende Lastspitzen durch intelligentes Entladen der Batterien intern zu glätten. Ferner seien über das Laden der Stromspeicher in Zeiten niedriger Strompreise auch Synergieeffekte für Strommarkt und Verbraucher zu erreichen. In Abbildung 24 kann die von Atabay et al. vorgeschlagene Interaktion von Energiequellen, Stromspeicher, Strommärkten und der PPS zusammenfassend nachvollzogen werden (vgl. Atabay et al., 2014, S. 6f).

Das Konzept der Regelenergie wurde im obigen Absatz bereits kurz erwähnt und soll nun aufgrund seines beachtlichen Stellenwerts in der analysierten Literatur nochmal

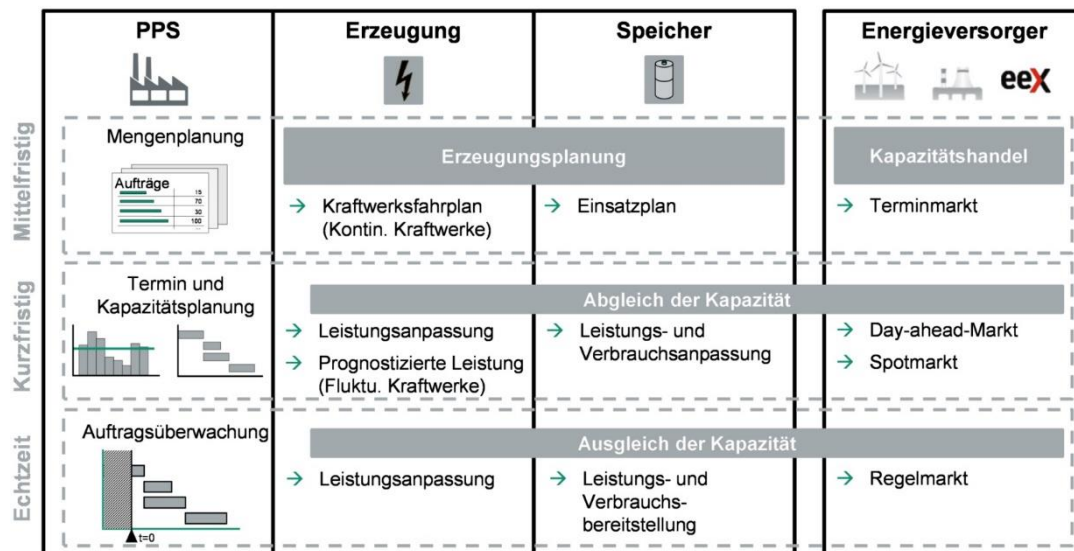


Abbildung 24: PPS im Kontext von Energiequellen, Stromspeicher und -märkten (Atabay et al., 2014, S. 7)

präzisiert werden. Grundsätzlich dient die Regelernergie der Sicherstellung der Netzfrequenz von 50 Hertz, die durch das ständige Wechselspiel von Stromerzeugung und Stromverbrauch belastet wird und deswegen ausgeglichen werden muss. Bei Strommangel, also fallender Netzfrequenz, gleichen zusätzliche Stromerzeuger die Situation mit positiver Regelernergie aus. Stromüberschuss führt dagegen zu einer steigenden Netzfrequenz und verlangt deswegen nach der sog. negativen Regelernergie. Die benötigte Regelernergie wird täglich von den Übertragungsnetzbetreibern ausgeschrieben und birgt, abhängig von gewissen Faktoren wie z.B. der Aktivierungsgeschwindigkeit, interessante Wertschöpfungspotenziale für industrielle Verbraucher (vgl. Matzen & Tesch, 2017, S. 258).

Auch Stromspeicher übernehmen gegenwärtig bereits eine tragende Rolle im Kontext der Regelernergie. In Verbindung mit der entsprechenden Leistungselektronik können diese am Regelernergiemarkt sowohl zur Bereitstellung von negativer als auch positiver Regelleistung eingesetzt werden. Verbunden mit den beschriebenen individuellen Wertschöpfungsmöglichkeiten macht die Integration der Stromspeicher in die auf dezentralen und erneuerbaren Energien basierende PPS nicht nur aus ökonomischen Gründen einen Sinn. Auch volkswirtschaftlich leisten Energiespeicher über den Erzeugungs- und Prognoseausgleich einen Beitrag zur Verstetigung der erneuerbaren Energien. Sie entlasten zusätzlich Versorgungs- und Verteilnetze und erhöhen damit die Versorgungssicherheit. In Bezug auf die Anwendung im industriellen Produktionsumfeld können Stromspeicher im Falle von Netzausfällen ebenfalls dafür sorgen, dass

sowohl bedeutsame infrastrukturelle Einrichtungen wie Rechen- und Telekommunikationszentren als auch sicherheitsrelevante Anlagen unterbrechungsfrei versorgt werden (vgl. Sterner & Stadler, 2017, S. 691ff). Für einen detaillierteren Einblick in Flexibilitätsmärkte wie Regenergie- oder Spotmarkt wird auf die Ausführungen von Matzen und Tesch verwiesen (Matzen & Tesch, 2017).

Neben dem Nutzen des Regenergiemarktes und der Installation von Energiespeicher zählt auch das sogenannte Demand-Side-Management (DSM) zu den relevanten Flexibilitätsoptionen bei der Integration der erneuerbaren Energien in die Produktionsplanung und -steuerung. Allgemein sind DSM-Programme dazu konzipiert, die Nachfrageflexibilität, beispielsweise durch Elastizitäts- oder Effizienzsteigerungen, zu erhöhen. Das Prinzip des DSM, die Nachfrage auf das Angebot abzustimmen, spielt bei der Integration von variablen, erneuerbaren Energien in Stromversorgungssysteme eine zentrale Rolle. Aus der Nachfragesperspektive kann das DSM in die Energieeffizienz und die sogenannte Demand Response (DR) unterteilt werden. Zielt die Energieeffizienz darauf ab, die Energienachfrage zu senken, so versucht die DR den Zeitpunkt der Nachfrage zu ändern, während der Gesamtverbrauch oftmals unverändert bleibt. Kurzum versucht die DSM also sowohl die Menge als auch den Zeitpunkt der Elektrizitätsnachfrage zu beeinflussen. Wie in Abbildung 25 illustriert, existieren dazu folgende Möglichkeiten der Beeinflussung und Gestaltung der entsprechenden Lastkurven. Die Ziele der verdeutlichten Ansätze sind wie folgt (vgl. Beier, 2017, S. 40f):

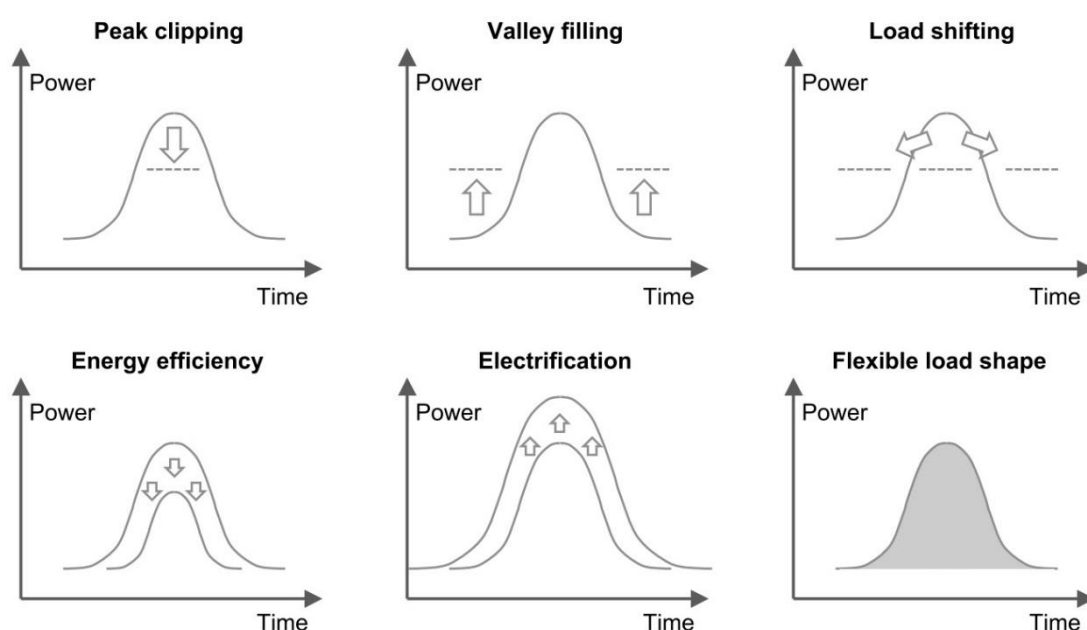


Abbildung 25: Beeinflussung und Gestaltung von Lastkurven (Beier, 2017, S. 41)

- *Peak clipping* reduziert Spitzenlasten im System um die Notwendigkeit von Reservekapazitäten zu verringern.
- *Valley filling* zielt darauf ab, die Stromnachfrage außerhalb der Spitzenzeiten zu erhöhen.
- *Load shifting* reduziert ebenfalls Spitzenlasten im System, aber ohne die Gesamtnachfrage signifikant zu ändern.
- *Energy efficiency* zielt darauf ab, den Gesamtstromverbrauch zu verringern, um Ressourcen zu schonen.
- *Electrification* erhöht den Gesamtstromverbrauch, beispielsweise bei der Kraftstoffumstellung auf elektrische Antriebe.
- *Flexible load shape* beschreibt eine Richtlinie der Stromversorger die Kundennachfrage zu beeinflussen um die Versorgungssicherheit zu ermöglichen.

Abschließend kann nun mit Schultz et al. behauptet werden, dass die Stromerzeugung in Zeiten volatiler Energiesysteme nicht länger der zukünftigen Nachfrage angeglichen werden kann. Diese Prämisse werde sich annähernd reversieren. Das damit verbundene DSM sei vor allem für industrielle Verbraucher attraktiv, da deren potenzielle Lastverschiebungen auf einer deutlich größeren Skala als die der privaten Verbrauchern stattfinden kann (vgl. Schultz, Braunreuther, & Reinhart, 2016, S. 1).

### Weitere individuelle Lösungsansätze

Im folgenden Teil werden abschließend zwei Konzepte vorgestellt, die aufgrund ihres ganzheitlichen, bereichsübergreifenden Charakters nur bedingt in einen der vorangegangenen Sinnabschnitte einzuordnen waren. Beide Konzepte wurden im Jahre 2016 veröffentlicht und sind deshalb auch aufgrund ihrer Aktualität durchaus von Relevanz.

Der erste Lösungsansatz von Beier et al. beschäftigt sich mit einer Methode der Echtzeit-Steuerung von Fertigungssystemen, die den Gebrauch von dezentralen, variablen Energiequellen erhöhen soll, ohne dabei den Systemdurchsatz der Produktion zu kompromittieren. Die Entwicklung und Modellierung dieses Steuerungskonzepts wird mit Abbildung 26 grafisch repräsentiert.

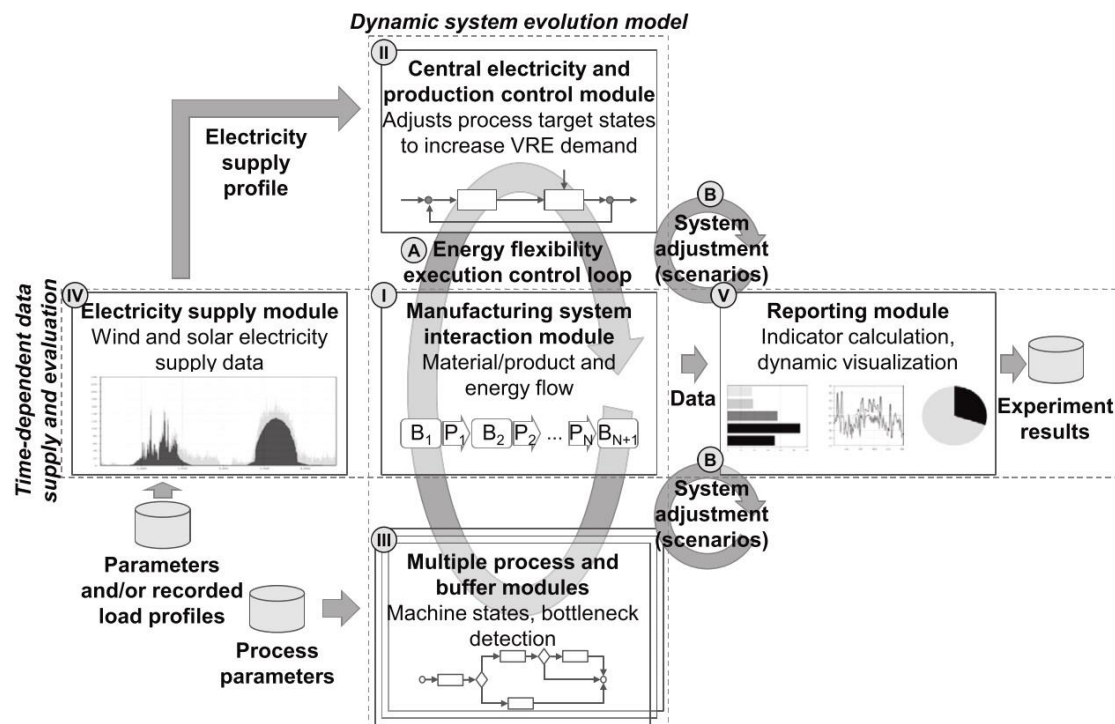


Abbildung 26: Konzept zur Echtzeit-Steuerung von Fertigungssystemen im Kontext der Einbindung von dezentralen, variablen Energiequellen (Beier et al., 2017, S. 6)

Im Zentrum des Modells befindet sich ein dynamisches Fertigungssystem, in dem die zwei Hauptebenen des Konzepts, die vertikal angelegte Systementwicklungsebene und die horizontal dargestellte Datenversorgungsebene, aufeinandertreffen und interagieren. Teil der dynamischen Systementwicklungsebene ist dabei zum einen die zentrale Produktions- und Elektrizitätssteuerung und zum anderen ein vereintes Modul zur Lieferung spezifischer Prozessinformationen. Die Datenversorgungsebene hingegen berücksichtigt einerseits ein Modul, das zeitabhängige Stromerzeugungsprofile zur Verfügung stellt, andererseits beinhaltet sie einen Baustein der verschiedene Leistungskennzahlen errechnet und visualisiert. Ferner existieren zwischen den besagten Ebenen zwei verschiedenartige Feedbackschleifen. Schleife A zielt darauf ab, die Abstimmung zwischen Stromnachfrage und variablem Erzeugungsangebot unter Einhaltung eines konstanten Durchsatzes zu verbessern. Die mit B gekennzeichneten Schleifen sorgen hingegen unter ständiger Angleichung der Systemparameter dafür, dass die Effektivität der energieorientierten Steuerungsmaßnahmen für verschiedene Szenarien evaluiert wird (vgl. Beier et al., 2017, S. 5).

Nachdem verschiedene Szenarien anhand einer ausführlich implementierten Simulation, deren Details über den Rahmen dieses Kapitels hinausgehen würden, ausgearbeitet wurden, liefern Beier et al. zusammenfassend folgende Fakten und Ergebnisse

zu ihrer Methodik. Mittels des vorgeschlagenen Konzepts aus Abbildung 26 konnte die Nutzung der dezentralen, erneuerbaren Elektrizität im Vergleich zur steuerungsreifen Herangehensweise, bei gleichem Output der Fertigung, um mehr als 10% erhöht werden. Des Weiteren wird dargelegt, dass sich die energieflexiblen Steuerungsmaßnahmen bei manchen Szenarien jedoch unvorteilhaft auf die Durchlaufzeit und die Nachfrage nach externer Elektrizität auswirken. Zudem bewirkte die Festlegung längerer Zykluszeiten (Kundentakte) einen generellen Anstieg der Durchlaufzeiten, was die Autoren vor allem auf die durch energieflexible Maßnahmen erhöhten Pufferzeiten zurückführen. Alles in allem betonen Beier et al. dennoch, dass die gesammelten Resultate der Anwendung ihres energetischen Echtzeit-Steuerungskonzeptes einen durchwegs positiven Beitrag zur Integration der variablen, erneuerbaren Energien in bestehende Netzstrukturen leisten und den Ausbau der dezentralen Energieversorgung voranbringen. Die vorgeschlagene Methodik diene dabei klar der Verwirklichung von Flexibilitätszielen auf dem Level der MES und weniger dem Sichten eines optimalen Fertigungsplans. Nichtsdestotrotz wird seitens der Autoren auch darauf hingewiesen, dass die im Zusammenhang mit der energieflexiblen Steuerung erreichten hohen Durchlaufzeiten und Lagerbestände dem traditionellen Paradigma des Lean Manufacturing widersprechen und somit im Zielkonflikt dazu stehen (vgl. Beier et al., 2017, S. 10ff).

Der zweite Lösungsansatz, ebenfalls von Beier et al., befasst sich im Kontext der dezentralen, erneuerbaren Energieerzeugung mit der Einbindung von Elektroautos in die Fertigungssysteme von Unternehmen. Unter dem übergeordneten Ziel der Minimierung der Netzabhängigkeit sollen die Elektroautos dem System zum Be- und Entladen zur Verfügung stehen (vgl. Beier, Neef, Thiede, & Herrmann, 2016, S. 3). Die in

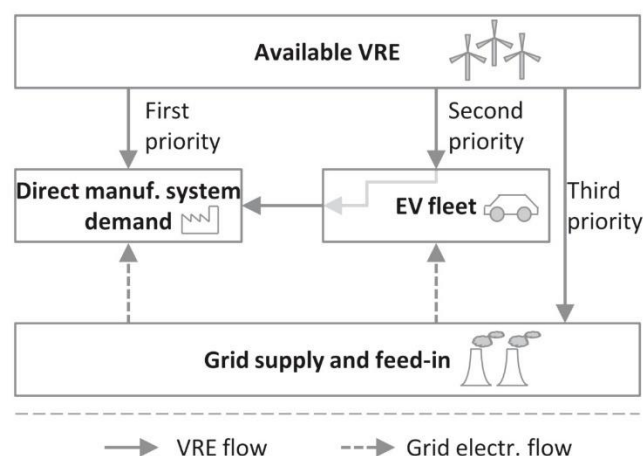


Abbildung 27: Elektroautos im Unternehmenssystem (Beier, Neef, Thiede, & Herrmann, 2016, S. 3)

Abbildung 27 dargestellten Elemente des Versorgungssystems stehen dabei prinzipiell in ständigem Austausch von Informationen und Elektrizität. Die vor Ort produzierte Energie aus erneuerbaren Quellen fließt mit oberster Priorität zuerst direkt in das Fertigungssystem, ehe es nach dessen Sättigung zum Beladen der Elektroautos verwendet wird. Unterste Priorität genießt dabei die Einspeisung der überschüssigen Energie in das öffentliche Stromnetz. Kann der Energiebedarf der Produktion nicht durch die dezentralen Erzeugungsanlagen gedeckt werden, übernimmt das öffentliche Stromnetz die Versorgung des Fertigungssystems und das Beladen der Elektroautos. Zu welchen Zeitpunkten und in welchen Mengen die Elektroautos vom Fertigungssystem entladen werden, entscheidet ein Steuerungselement anhand der aktuellen Mobilitätsanforderungen der Fahrzeuge. Die komplette Abstimmung aller Elemente kann laut Beier et al. ein Echtzeit-Steuerungssystem, wie beispielsweise in Abbildung 26 dargestellt, übernehmen (vgl. Beier et al., 2016, S. 2).

Nachdem auch hierzu verschiedene Szenarien beleuchtet wurden, kommen die Autoren zu folgenden Schlüssen: Periodisch eingebundene Stromspeicher von Elektroautos können die wertschöpfende Integration von dezentralen, erneuerbaren Energiequellen in Fertigungssysteme verbessern. Auch wenn stationäre Batterien aufgrund ihrer ununterbrochenen Verfügbarkeit effektiver sind, punkten die Elektroautos durch ihre doppelte Verwendungsmöglichkeit. Präziser ausgedrückt müssen, für die zukünftig ohnehin bereitstehenden Batterien der Elektroautos, keine zusätzlichen Investitionen bzw. Installationen getätigt werden. Trotz allem sollte die dadurch steigende Anzahl der Batterieladezyklen der Elektroautos sowohl aus ökonomischer als auch ökologischer Sicht kritisch evaluiert werden (vgl. Beier et al., 2016, S. 6).

### **3.3.2 Ökologische Aspekte der Optimierungskonzepte**

Im Zuge der Literaturanalyse wurde grundsätzlich beobachtet, dass die Lösungsansätze zur Kombinierung von Energiemanagement- und PPS-Systemen vorherrschend darauf abzielen, ökonomisch effiziente Einbindungsmöglichkeiten der dezentralen, erneuerbaren Energiequellen in das Fertigungsumfeld zu entwickeln. Konzepte, bei denen es hingegen primär um ökologisch motivierten Zielvorstellungen geht, konnten nur schwer identifiziert werden. Nichtsdestotrotz spielt der Faktor des Umweltschutzes und der Nachhaltigkeit für die Mehrheit der untersuchten Werke eine nicht unbedeutende

Rolle. Deshalb soll in diesem Kapitel nun zusammenfassend verdeutlicht werden, welche ökologischen Aspekte im Kontext der kombinierten EM/PPS-Systeme von hoher Relevanz sind.

Um ihre Wettbewerbsfähigkeit aufrecht zu erhalten, muss sich die produzierende Industrie zukünftig verstärkt mit einem Paradigmenwechsel im Bereich des Energie- und Ressourcenbewusstseins auseinandersetzen. Das Ziel dieses Wandels ist es demnach, ökologisch saubere Fertigungssysteme zu implementieren, die ungeachtet ihrer Größe und ihres Standortes, alle Chancen einer nachhaltigen Entwicklung zu nutzen wissen. Das ökologische Interesse und die damit verbundenen Besorgnisse spielen aber auch seitens der Kunden eine immer größere Rolle und müssen deshalb in Form von „grünen“ Entwicklungsmaßnahmen ernst genommen werden (vgl. May et al., 2016, S. 6). Eine äußerst effektive Maßnahme zur Verbesserung der ökologischen Leistung eines Unternehmens ist das Nutzen von Energie aus erneuerbaren Quellen, wie z.B. Sonne und Wind, die weltweit im Überfluss zur Verfügung stehen. Diese Behauptung lässt sich mit einem Blick auf den CO<sub>2</sub>-Ausstoß der Photovoltaik belegen. Auf Basis von PV-Anlagen erzeugte Elektrizität setzt in etwa 0,01 kg CO<sub>2</sub> pro erzeugter Kilowattstunde (kWh) frei. Aus dem Stromnetz stammende Elektrizität verursacht im Schnitt etwa 0,07 kg CO<sub>2</sub>/kWh und emittiert damit die siebenfache Menge an Treibhausgasen bei gleichem Stromverbrauch (vgl. Sangwan et al., 2018, S. 2ff). Duflou et al. präzisieren in diesem Zusammenhang, dass Unternehmen mit diskreter, konvergierender Produktionsstruktur auf zwei verschiedene Arten am CO<sub>2</sub>-Ausstoß beteiligt sind. Einerseits erfolgt die Emission von Treibhausgasen auf indirektem Wege über den Bezug von Elektrizität, andererseits verursacht der Gebrauch von fossilen Brennstoffen einen direkten Beitrag zum Ausstoß von Kohlenstoffdioxid. Aufgrund dieser Tatsache wird es den Autoren zufolge immer offensichtlicher, welche kritische und facettenreiche Rolle die produzierende Industrie in Bezug auf die heutigen Energieressourcen einnimmt (vgl. Duflou et al., 2012, S. 2). Die ökologische Orientierung der Industrie gewinnt jedoch nicht nur aus Sicht der sozialen Verantwortung immer mehr an Gewicht. Aufgrund der Tatsache, dass der Kunde gegenwärtig nicht nur vom Produkt, sondern auch vom Hersteller umweltschonenderes Verhalten einfordert, kann die Ökologie zugleich auch mit ökonomisch motivierten Zielstellungen vereint werden. Produkte die auf energieeffiziente, umweltfreundliche Weise hergestellt und dementsprechend vermarktet werden, erzielen am Markt höhere Preise, auch wenn dabei die subjektive Auffassung des Kunden nicht außer Acht gelassen werden sollte (vgl. Matzen & Tesch,

2017, S. 243). Das eben erwähnte Green-Marketing sei aber auf Dauer nur dann effektiv, wenn es als Unterstützung einer bereits bestehenden „grünen“ Unternehmensphilosophie verstanden wird (vgl. Matzen & Tesch, 2017, S. 236). Elektrizität dezentral aus erneuerbaren Quellen zu erzeugen und sie im Fertigungsumfeld intelligent zu nutzen kann Teil einer solchen Philosophie sein. Mit anderen Worten bedeutet dies, dass das ökologische Potenzial der dezentralen, erneuerbaren Energien im Industriesektor nur dann komplett ausgeschöpft wird, wenn neben der reinen Nutzung der Anlagen auch eine intelligente Integration in die Produktionsplanung und -steuerung des jeweiligen Unternehmens erfolgt. Belegt wird diese Behauptung durch die Ergebnisse des in Abbildung 26 vorgestellten Konzepts zur Echtzeit-Steuerung von Fertigungssystemen von Beier, Thiede & Herrmann. Unter Verwendung dieses Ansatzes konnte der CO<sub>2</sub>-Ausstoß pro Erzeugnis im Vergleich zur steuerungsfreien Nutzung um mehr als 17% gesenkt werden. Der Output der Produktion blieb dabei konstant (vgl. Beier et al., 2017, S. 10).

### **3.4 Simulationsmodell als Planungstool**

Der folgende Abschnitt dient dazu, anhand einer selbstständig programmierten Simulation Aufschluss darüber zu geben, welche Konsequenzen die Nutzung von dezentralen, erneuerbaren Energiequellen für ein konkretes Fertigungsvorhaben einer Fabrik mit sich bringt. Grundsätzlich ist diese Simulation weniger als spezifisches Lösungsmodell, sondern mehr als generisches Konzeptmodell zu verstehen und fungiert damit schlussendlich als flexibles Planungstool für potenziell interessierte Unternehmen.

#### **3.4.1 Ausgangssituation**

Im Sinne der festgelegten Forschungsfragen der Diplomarbeit sollten die in Kapitel 3.2 und 3.3 erarbeiteten Konzepte mittels einer Simulation unterstützt werden, die sowohl das dynamische Zusammenspiel von Energieangebot und -nachfrage als auch dessen Konsequenzen veranschaulicht. Die Entwicklung eines flexiblen Simulationsmodells und einer beispielhaften Simulationsstudie zur Unterstützung der Planung von kombinierten EM/PPS-Systemen war damit als weitere zentrale Aufgabenstellung der Diplomarbeit fixiert. Um in Hinblick auf die Anwendung dieses Modells einen realen Bezug zur Praxis herstellen zu können, wurde die Simulationsstudie in Kooperation mit der

Pilotfabrik Industrie 4.0 der TU Wien konstruiert. Aus Sicht der Pilotfabrik lag die Aufgabenstellungen dabei darauf, das partiell festgelegte Produktionsprogramm ihrer real existierenden 3D-Drucker-Herstellung hinsichtlich einer möglichen Versorgung durch dezentrale, erneuerbare Energiequellen zu variieren bzw. zu optimieren.

Im Kern stützt sich das Simulationsmodell auf zwei verschiedene Inputgrößen. Einerseits ist dies der momentane Stromverbrauch des konkreten Fertigungsvorgangs und andererseits das durch dezentrale Photovoltaik- und Windkraftanlagen erzeugte Elektrizitätsangebot. Die genauen Daten zum Energieverbrauch der Produktion wurden dazu direkt von der Pilotfabrik der TU Wien bereitgestellt. Auf Grundlage dieser Daten war seitens der Fertigung außerdem Folgendes für die Simulation festgelegt.

Die Produktion basiert grundsätzlich auf einem fixierten Auftragsmuster, das sich durch zwei signifikante Nachfragespitzen zur Mitte und zum Ende des Jahres auszeichnet. In einer achtstündigen Schicht können prinzipiell fünf 3D-Drucker produziert werden, während die Herstellung eines dieser 3D-Drucker einen konstanten Stromverbrauch von 26,4 kWh verursacht. Im Falle größerer Nachfrage, ermöglicht die Produktion eine Erhöhung der Kapazität auf drei verschiedene Arten:

- Erhöhung des Takts innerhalb einer Schicht bei gleicher Belegschaft auf maximal 120%, d.h. eine Produktion von sechs 3D-Druckern in acht Stunden.
- Einführung einer zweiten achtstündigen Schicht (Spätschicht).
- Einführung der Wochenendarbeit, sowohl Samstag als auch Sonntag, mit einer oder zwei Schichten.

Angebotsseitig stammen die Daten zur Errechnung der erzeugten Elektrizität aus dem *Photovoltaic Geographical Information System* (PVGIS) der Europäischen Kommission. Mit einem kostenlos verfügbaren Online-Tool lassen sich damit standortspezifisch sowohl Globalstrahlungs- als auch Windgeschwindigkeitsdaten vergangener Jahre in stündlicher Auflösung auslesen und als CSV-Dateien herunterladen (vgl. European Commission, 2018). Ausgehend von diesem Input eröffnen sich für das Modell weitreichende Möglichkeiten im Hinblick auf die Simulation des Energieverbrauchs verschiedener Produktionspläne und deren Zusammenspiel mit den volatil zur Verfügung stehenden Versorgungsströmen. Der Zeitrahmen des Modells wurde dabei auf ein komplettes Jahr festgelegt, um neben den jahreszeitlichen Erzeugungsschwankungen der erneuerbaren Energien auch nachfragegesteuerte Fertigungsperioden

unterschiedlicher Intensität berücksichtigen zu können. Sowohl die angebots- als auch nachfrageseitige Datenquelle beinhaltet stündliche Werte und umfasst damit auf ein komplettes Jahr gesehen im Gesamten 8760 Datenpaare. Abbildung 28 zeigt einen Ausschnitt aus beiden Datensätzen, die aus dem ursprünglichen CSV-Format in Microsoft Excel importiert wurden. Damit das Simulationsprogramm theoretisch auf verschiedenste Standorte angewendet werden kann, wird die erzeugte Elektrizität in einem der ersten Schritte der Simulation auf Basis der Globalstrahlung bzw. Windgeschwindigkeit errechnet und ist anfänglich nicht als Input-Größe festgelegt. Das PVGIS-Tool der Europäischen Kommission liefert für frei wählbare Standorte sowohl Globalstrahlungswerte ( $\text{W/m}^2$ ) mit beliebiger Ausrichtung der PV-Module als auch Windgeschwindigkeiten ( $\text{m/s}$ ) in einer Höhe von 10m über der Erdoberfläche und war deshalb von großem Nutzen für das Simulationsmodell. Ein weiterer Vorteil dieser Herangehensweise ist, dass diverse anlagenspezifische Parameter wie Wirkungsgrade, Systemverluste, Flächenverfügbarkeiten und Rotorgrößen vor dem Start der Simulation definiert werden können und somit effektiv in die Berechnung des Elektrizitätsoutputs einfließen.

| A  |                  |                   |           | B  |                  |            |
|----|------------------|-------------------|-----------|----|------------------|------------|
|    | A                | B                 | C         |    | A                | B          |
| 1  | date_time        | global irradiance | windspeed | 1  | date_time        | demand_kWh |
| 2  | 01.01.2016 01:00 | 0.00              | 2.84      | 2  | 01.01.2016 00:00 | 0,00       |
| 3  | 01.01.2016 02:00 | 0.00              | 2.92      | 3  | 01.01.2016 01:00 | 0,00       |
| 4  | 01.01.2016 03:00 | 0.00              | 3.00      | 4  | 01.01.2016 02:00 | 0,00       |
| 5  | 01.01.2016 04:00 | 0.00              | 3.08      | 5  | 01.01.2016 03:00 | 0,00       |
| 6  | 01.01.2016 05:00 | 0.00              | 3.15      | 6  | 01.01.2016 04:00 | 0,00       |
| 7  | 01.01.2016 06:00 | 0.00              | 3.23      | 7  | 01.01.2016 05:00 | 0,00       |
| 8  | 01.01.2016 07:00 | 0.00              | 3.31      | 8  | 01.01.2016 06:00 | 0,00       |
| 9  | 01.01.2016 08:00 | 3.00              | 3.39      | 9  | 01.01.2016 07:00 | 0,00       |
| 10 | 01.01.2016 09:00 | 25.00             | 3.96      | 10 | 01.01.2016 08:00 | 16,50      |
| 11 | 01.01.2016 10:00 | 31.00             | 4.13      | 11 | 01.01.2016 09:00 | 16,50      |
| 12 | 01.01.2016 11:00 | 40.00             | 4.31      | 12 | 01.01.2016 10:00 | 19,80      |
| 13 | 01.01.2016 12:00 | 59.00             | 4.48      | 13 | 01.01.2016 11:00 | 19,80      |
| 14 | 01.01.2016 13:00 | 108.00            | 3.79      | 14 | 01.01.2016 12:00 | 19,80      |
| 15 | 01.01.2016 14:00 | 46.00             | 3.09      | 15 | 01.01.2016 13:00 | 19,80      |
| 16 | 01.01.2016 15:00 | 21.00             | 2.40      | 16 | 01.01.2016 14:00 | 16,50      |
| 17 | 01.01.2016 16:00 | 0.00              | 2.40      | 17 | 01.01.2016 15:00 | 16,50      |
| 18 | 01.01.2016 17:00 | 0.00              | 2.41      | 18 | 01.01.2016 16:00 | 0,00       |
| 19 | 01.01.2016 18:00 | 0.00              | 2.41      | 19 | 01.01.2016 17:00 | 0,00       |
| 20 | 01.01.2016 19:00 | 0.00              | 2.44      | 20 | 01.01.2016 18:00 | 0,00       |
| 21 | 01.01.2016 20:00 | 0.00              | 2.47      | 21 | 01.01.2016 19:00 | 0,00       |
| 22 | 01.01.2016 21:00 | 0.00              | 2.50      | 22 | 01.01.2016 20:00 | 0,00       |
| 23 | 01.01.2016 22:00 | 0.00              | 2.54      | 23 | 01.01.2016 21:00 | 0,00       |
| 24 | 01.01.2016 23:00 | 0.00              | 2.58      | 24 | 01.01.2016 22:00 | 0,00       |
| 25 | 01.01.2016 00:00 | 0.00              | 2.62      | 25 | 01.01.2016 23:00 | 0,00       |

Abbildung 28: Ausschnitt aus den Datensätzen zur Globalstrahlung/Windgeschwindigkeit (A) und zum Stromverbrauch der 3D-Drucker-Fertigung (B)

### 3.4.2 Vorgehensweise

Prinzipiell kann ein Simulationsmodell nach drei Paradigmen entwickelt werden, die im Wesentlichen für die verschiedenen modellhaften Sichtweisen des aus der Realität stammenden Sachverhaltes stehen. Das *System Dynamics* (SD) Paradigma abstrahiert individuelle Objekte und arbeitet auf Basis von Flussvorgängen, Beständen und Feedbackschleifen. Das *Discrete-Event* (DE) Modell hingegen verfolgt einen prozessorientierten Ansatz, in welchem die dynamischen Vorgänge durch eine Sequenz verschiedener Operationen beschrieben werden. Indessen stellt der *Agent-Based* (AB) Ansatz das System aus Sicht individueller Objekte dar, die innerhalb einer bestimmten Umgebung miteinander kommunizieren. Abhängig von den Zielen des Simulationsprojekts sowie den zur Verfügung stehenden Daten, können die Problemstellungen mittels dieser Paradigmen abstrahiert werden (vgl. Borshchev, 2014, S. 248).

Die Multimethoden-Modellierungssoftware *Anylogic*<sup>®</sup> von *The Anylogic Company* bietet die Möglichkeit, eine paradigmenerübergreifende Hybrid-Simulation zu erstellen, die sowohl kontinuierliche Energieflüsse (SD-Modell) als auch präzise Steuerungsentscheidungen (DE-Modell) berücksichtigt und gleichzeitig frei definierte Objekte (AB-Modell) wie Energieerzeugungsanlagen, Stromspeicher und Produktionsmaschinen untereinander kommunizieren lässt. Aufgrund dieser Eigenschaften eignet sich die *Anylogic*<sup>®</sup>-Software hervorragend für die Darstellung des Zusammenspiels von dezentralen, Energieerzeugern mit einer konkreten Stückgut-Produktion. Angefertigt wurde die Simulation letztendlich mit der kostenlos verfügbaren *Personal Learning Edition* der Version 8.2.3.

#### Definition der Szenarien

Um darzulegen, inwiefern das geschaffene Simulationsprogramm als Planungstool für die Kombination von dezentralen, erneuerbaren Energieerzeugern mit der Produktionsplanung und -steuerung eines Unternehmens genutzt werden kann, konzentriert sich der folgende Abschnitt zunächst auf die Definition der im Rahmen der Simulation durchlaufenen Szenarien.

Prinzipiell entstehen die besagten Szenarien aus einer Kombination von fünf imaginären Unternehmen mit fünf möglichen Produktionsplänen zur beschriebenen 3D-Drucker-Herstellung. Die Unternehmen sind dazu auf verschiedene Art und Weise mit PV-Anlagen, Kleinwindkraftanlagen und Batteriespeicher ausgestattet, während die

Produktionspläne unter Berücksichtigung der im Kapitel 3.4.1 erläuterten Einschränkungen erstellt wurden. Abbildungen 29 und 30 zeigen dazu sowohl die unterschiedlich festgelegten Unternehmensausführungen als auch die diversen Eigenschaften der erstellten Produktionspläne. Abbildung 29 bietet den Nutzern außerdem die Möglichkeit vorab festzulegen, unter welcher Motivation und mit welchem Budget die Simulation betrachtet werden soll. Dies dient lediglich der späteren Optimierung des Systems und hat auf die Ergebnisse der einzelnen Simulationsdurchgänge keinen Einfluss.

Wie nun in Abbildung 29 zu erkennen ist, unterscheiden sich die Unternehmen U1 bis U5 zuerst einmal durch die Größe und damit Leistung ihrer Photovoltaik-Anlage, die grundsätzlich bei allen betrachteten Unternehmen vorhanden ist. Auch der Batteriespeicher gehört, außer bei U5, zur standardmäßigen Ausrüstung, zeigt grundlegend aber deutliche Unterschiede in seiner Kapazität. Des Weiteren existieren für die Anwendung des Simulationstools zwei Ausführungen dezentraler Kleinwindkraftanlagen, welche sich ebenfalls über ihre Größe und damit Leistung unterscheiden. Für die Unternehmen U2 und U4 wurde auf die Berücksichtigung der Kleinwindkraft verzichtet. Im Endeffekt soll diese variable Dimensionierung bzw. das beabsichtigte Weglassen bestimmter Erzeugungs- und Speicheranlagen Aufschluss darüber geben, von welcher Bedeutung die einzelnen Anlagen für die diversen Zielgrößen der Simulation sind. Über die gleichzeitige Kombination mit den voneinander abweichenden Produktionsplänen soll zusätzlich gezeigt werden, welche Konsequenzen von nachfrageseitigen Änderungsmaßnahmen ausgehen können. In Anbetracht der in Abbildung 30 dargestellten Produktionspläne P1 bis P5 ist prinzipiell zu erkennen, dass auf Basis der in 3.4.1 dargestellten Auflagen darauf abgezielt wird, erhebliche Unterschiede bezüglich der maximalen Lagerbestände, der vorgegebenen Lieferzeiten und der Flexibilität in Takt- und Schichtorganisation zu generieren. Diese fixierten Unterschiede wurden im darauffolgenden Schritt in detaillierte Wochenpläne übersetzt (vgl. Abb. 43-47 des Anhangs). Aufbauend auf einem feststehenden Auftragseingang zeigen die Pläne P1 bis P5 signifikante Unterschiede in der allgemeinen Organisation der 3D-Drucker-Herstellung. Besonders die Lagerbestände können anhand der Abbildungen 43 bis 47 anschaulich verfolgt werden.

| Eigenschaften der Unternehmen | PV-Anlage bzw. Dachfläche                       | Kleinwindkraft-Anlage bzw. Rotordurchmesser | Batteriespeicher      | Budget | Ziele bzw. Motivation (zum Ankreuzen)                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|-------------------------------|-------------------------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------|--------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>U1</b>                     | 200 kWp<br>~ 1600 m <sup>2</sup><br>(60m x 30m) | 10 kWp<br>Ø 7,8m<br>Höhe 10-15m             | Optional<br>(100 kWh) | ?      | <input type="checkbox"/> Maximale Autarkie<br><input type="checkbox"/> Maximaler Eigenverbrauch<br><input type="checkbox"/> Kosteneinsparungen (Einspeisevergütung, Regelleistung)<br><input type="checkbox"/> Nachhaltigkeit<br><input type="checkbox"/> Versorgungssicherheit (Notstrom)<br><input type="checkbox"/> Pionier-Leistung und Image |
| <b>U2</b>                     | 100 kWp<br>~ 800 m <sup>2</sup><br>(40m x 20m)  | Keine                                       | Optional<br>(75 kWh)  | ?      | <input type="checkbox"/> Maximale Autarkie<br><input type="checkbox"/> Maximaler Eigenverbrauch<br><input type="checkbox"/> Kosteneinsparungen (Einspeisevergütung, Regelleistung)<br><input type="checkbox"/> Nachhaltigkeit<br><input type="checkbox"/> Versorgungssicherheit (Notstrom)<br><input type="checkbox"/> Pionier-Leistung und Image |
| <b>U3</b>                     | 50 kWp<br>~ 400 m <sup>2</sup><br>(20m x 20m)   | 5 kWp<br>Ø 5,6m<br>Höhe 8-20m               | Optional<br>(50 kWh)  | ?      | <input type="checkbox"/> Maximale Autarkie<br><input type="checkbox"/> Maximaler Eigenverbrauch<br><input type="checkbox"/> Kosteneinsparungen (Einspeisevergütung, Regelleistung)<br><input type="checkbox"/> Nachhaltigkeit<br><input type="checkbox"/> Versorgungssicherheit (Notstrom)<br><input type="checkbox"/> Pionier-Leistung und Image |
| <b>U4</b>                     | 25 kWp<br>~ 200 m <sup>2</sup><br>(20m x 10m)   | Keine                                       | Optional<br>(25 kWh)  | ?      | <input type="checkbox"/> Maximale Autarkie<br><input type="checkbox"/> Maximaler Eigenverbrauch<br><input type="checkbox"/> Kosteneinsparungen (Einspeisevergütung, Regelleistung)<br><input type="checkbox"/> Nachhaltigkeit<br><input type="checkbox"/> Versorgungssicherheit (Notstrom)<br><input type="checkbox"/> Pionier-Leistung und Image |
| <b>U5</b>                     | 50 kWp<br>~ 400 m <sup>2</sup><br>(20m x 20m)   | 5 kWp<br>Ø 5,6m<br>Höhe 8-20m               | Keiner                | ?      | <input type="checkbox"/> Maximale Autarkie<br><input type="checkbox"/> Maximaler Eigenverbrauch<br><input type="checkbox"/> Kosteneinsparungen (Einspeisevergütung, Regelleistung)<br><input type="checkbox"/> Nachhaltigkeit<br><input type="checkbox"/> Versorgungssicherheit (Notstrom)<br><input type="checkbox"/> Pionier-Leistung und Image |

Abbildung 29: Eigenschaften der Unternehmen U1 bis U5 im Überblick

| Eigenschaften<br>der<br>Produktionspläne | Auftragseingang                             | Bestände                                      | Schichtorganisation                                                               | Takt                                                                  | Wochenendarbeit                                             | Lieferzeit   | Sonstiges                                                                                      |
|------------------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|--------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>P1</b>                                | Verteilt über<br>gesamte Woche              | Gering, < 30;<br>Minimal am<br>Jahresende     | 1 oder 2 (mit einer<br>Woche<br>Planungsvorlauf)                                  | Mögliche<br>kurzfristige<br>Erhöhung                                  | Juli, August,<br>November,<br>Dezember                      | 1 Woche max. | Fertigstellung in<br>selber Woche                                                              |
| <b>P2</b>                                | Gesammelt am<br>Wochenbeginn                | Erhöht, < 90;<br>Minimal am<br>Jahresende     | 2 als Standard                                                                    | Immer erhöht<br>von 10-14 Uhr                                         | Standard                                                    | Minimal      | Doppelschicht<br>Montag und<br>Mittwoch;<br>Energieangebots-<br>orientiert                     |
| <b>P3</b>                                | Verteilt über<br>gesamte Woche              | Sehr hoch, < 260;<br>Minimal am<br>Jahresende | 2 als Standard<br>außer Freitag                                                   | Immer erhöht<br>von 10-18 Uhr<br>(Freitag von 10-<br>16 Uhr)          | Keine                                                       | Minimal      | Durchgehend<br>gleicher<br>Wochenablauf<br>unabhängig von<br>Auftragseingang                   |
| <b>P4</b>                                | Gesammelt Mitte<br>vorangegangener<br>Woche | Minimal, < 8;<br>Minimal am<br>Jahresende     | 1 oder 2 (gültig für<br>eine Woche,<br>geplant Mitte<br>vorangegangener<br>Woche) | Mögliche<br>kurzfristige<br>Erhöhung, primär<br>um die<br>Mittagszeit | Immer möglich,<br>geplant Mitte<br>vorangegangener<br>Woche | 2-3 Wochen   | Fokus ist<br>minimaler Bestand                                                                 |
| <b>P5</b>                                | Gesammelt Mitte<br>vorangegangener<br>Woche | Sehr hoch, < 300;<br>Minimal am<br>Jahresende | 1 oder 2 (gültig für<br>eine Woche,<br>geplant Mitte<br>vorangegangener<br>Woche) | Mögliche<br>kurzfristige<br>Erhöhung, primär<br>um die<br>Mittagszeit | Immer möglich,<br>geplant Mitte<br>vorangegangener<br>Woche | 2-3 Wochen   | Beruh auf<br>imaginärer<br>Wettervorhersage;<br>Hohe Produktion<br>bei hohem<br>Energieangebot |

Abbildung 30: Eigenschaften der Produktionspläne P1 bis P5 im Überblick

## Architektur und Zusammenhänge

Grundsätzlich besteht das Simulationsprogramm aus fünf zentralen Agenten, die dazu angelegt wurden die Kernbereiche des Systems detailliert zu beschreiben. Als Kernbereiche sind dabei die PV-Anlage, die Kleinwindkraftanlage, der Produktionsprozess, das Angebot-Nachfrage-Verhältnis und der Batteriespeicher definiert. Die Regelung der Interaktion all dieser Bereiche erfolgt innerhalb des Batteriespeicher-Agenten, der damit gleichzeitig als *Main-Agent* fungiert. Im Allgemeinen findet die Beschreibung der Agenten über die Kombination der *System Dynamics* Elemente mit den Funktionen der *State Charts* statt. Der über dieses Zusammenspiel generierte Output wird in dynamischen Variablen gespeichert und mittels *Stock-* und *Flow-Tools* näher definiert.

Zur Berechnung und Darstellung der stündlich erzeugten PV- und Windstrommenge rufen die *Transitions* der *State Charts* die in Abbildung 28 dargestellten Daten mittels einer *Database Query* aus der *Anylogic® Database* ab und speichern diese in einer temporären Variable. Im Anschluss daran wird diese Variable über mathematische Funktionen verwertet und in einer neuen dynamischen Variable gespeichert. Auf diese Art und Weise lässt sich aus den Globalstrahlungsdaten und Windgeschwindigkeiten die effektiv erzeugte Elektrizität berechnen. Da die exakte Berechnung der angestrebten Leistungswerte in der Realität aufgrund zahlreicher Einflussfaktoren sehr komplex ist und damit über den Rahmen der Simulation hinausgehen würde, beruhen die in den Agenten errechneten Leistungswerte auf schlankeren Näherungsformeln (vgl. 1 und 2). Die zur Berechnung des PV-Outputs angewandte Gleichung 1 wurde dazu aus den Ausführungen von Wagner abgeleitet (vgl. Wagner, 2015, S. 201ff). Die im Zusammenhang mit dem Output der Kleinwindkraftanlage verwendete Gleichung 2 stammt hingegen aus einem Artikel des BINE Informationsdienstes (vgl. BINE, 2018, S. 2). Beide Formeln liefern realistische, praxisnahe Erzeugungswerte und wurden noch

$$P_{pv} \text{ [kW]} = \frac{IRR \left[ \frac{W}{m^2} \right] * \eta_{pv} * SL * A_D \text{ [m}^2\text{]}}{1000} * f_{pv} \quad (1)$$

|            |                        |               |                     |
|------------|------------------------|---------------|---------------------|
| $P_{pv}$ : | Leistung der PV-Anlage | $SL$ :        | Systemverluste      |
| $IRR$ :    | Globalstrahlung        | $\eta_{pv}$ : | Wirkungsgrad PV     |
| $A_D$ :    | Verfügbare Dachfläche  | $f_{pv}$ :    | Anpassungsfaktor PV |

$$P_w[\text{kW}] = \frac{\rho_A \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] * A_R[\text{m}^2] * \eta_w * v_w^3 \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{s}^3} \right] * SL}{1000} * f_w \quad (2)$$

|            |                                   |            |                                 |
|------------|-----------------------------------|------------|---------------------------------|
| $P_w$ :    | Leistung der Kleinwindkraftanlage | $SL$ :     | Systemverluste                  |
| $\rho_A$ : | Luftdichte                        | $\eta_w$ : | Wirkungsgrad Windkraft          |
| $A_R$ :    | Rotorfläche                       | $f_w$ :    | Anpassungsfaktor Kleinwindkraft |
| $v_w$ :    | Windgeschwindigkeit               |            |                                 |

zusätzlich mit einem sog. Anpassungsfaktor  $f$  erweitert, um im Zuge der Simulation gegebenenfalls auf bereits feststehende Output-Vorstellungen der Benutzer reagieren zu können (beispielsweise bei bereits installierten PV- oder Windkraftanlagen). Grundsätzlich ist außerdem zu erwähnen, dass sich die in Kilowatt errechneten Leistungswerte im Simulationsprogramm über den Verlauf einer Stunde nicht ändern und deswegen als erzeugte Energie (in Kilowattstunden) verwertet werden können.

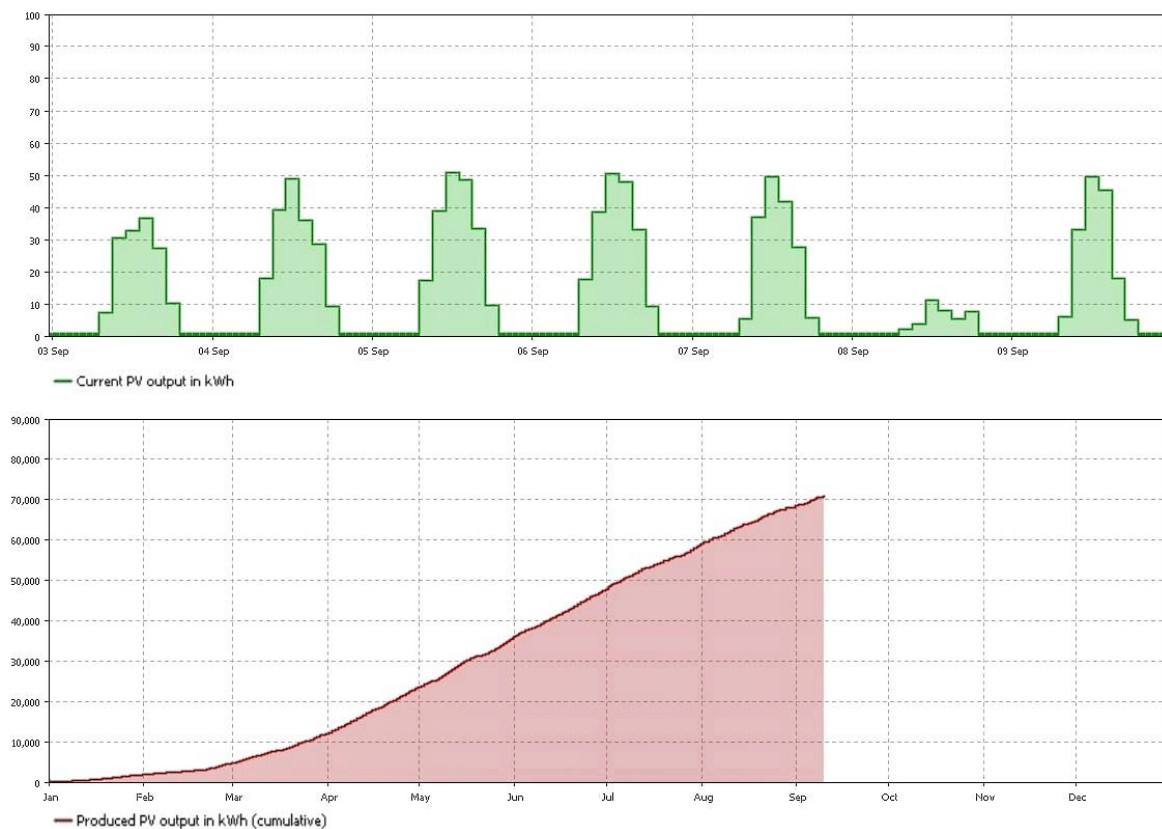
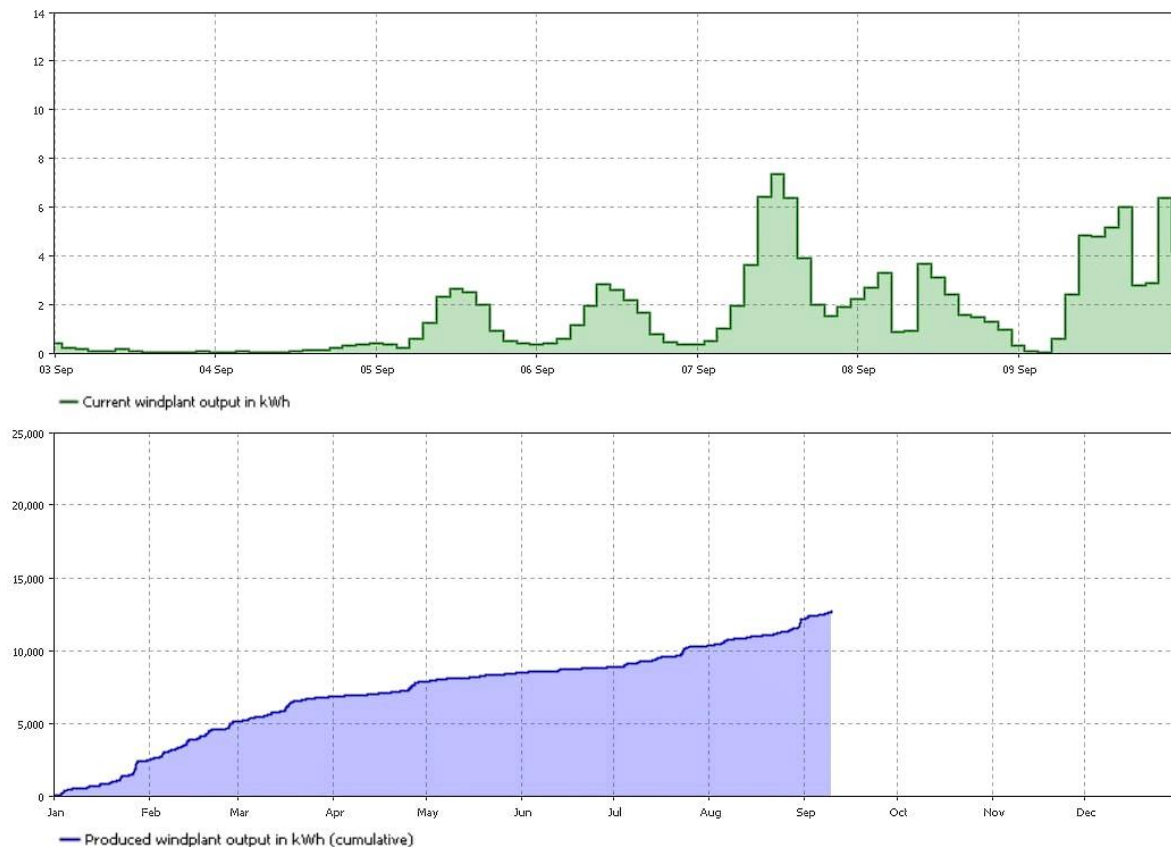


Abbildung 31: Aktueller und kumulierter Output der PV-Anlage während der Simulation

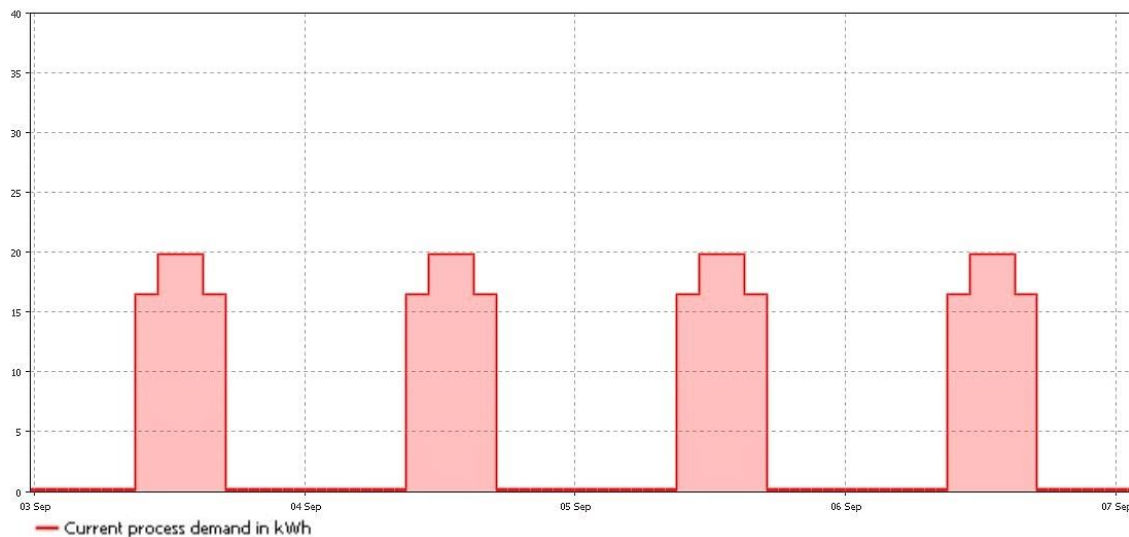
Schlussendlich kann der erzeugte Output des PV- und Wind-Agenten zusätzlich auf Basis verschiedener Analyse-Graphen gesondert nachvollzogen werden (vgl. Abbildung 31 und Abbildung 32). Im oberen Teil der beiden Abbildungen ist der Wochen-gang der PV- bzw. Windkraftanlage vom 3. bis 9. September dargestellt. Die Graphen darunter zeigen jeweils, welche Strommenge in kWh bis zu diesem Zeitpunkt bereits erzeugt wurde.



**Abbildung 32: Aktueller und kumulierter Output der Kleinwindkraftanlage während der Simulation**

Zur näheren Beschreibung des Produktionsprozesses der 3D-Drucker-Herstellung dient der sogenannte Prozess-Agent. Seine zentrale Aufgabe ist es, einen präzisen elektrischen Lastgang zu erzeugen, der den stündlichen Stromverbrauch der Fertigung dynamisch darstellt. Abbildung 33 zeigt ein Beispiel eines solchen Lastgangs über den Zeitraum von vier Tagen. Der Verlauf des Lastgangs basiert grundlegend auf den selbst entwickelten Produktionsplänen, die in Abbildung 43 bis 47 des Anhangs zu finden sind. In Abhängigkeit von den jeweiligen Zielstellungen im Bereich der Lagerbestände und Lieferzeiten können diese individuell angepasst werden. Aus jedem dieser Produktionspläne wird im Anschluss ein spezifischer Datensatz (vgl. Abbildung 28,

Abschnitt B) erstellt, dessen Datenpaare als Input für den Prozess-Agent des Simulationsmodells dienen und in der *Anylogic® Database* hinterlegt sind. Analog zu den Vorgängen im PV- und Wind-Agent ruft der Prozess-Agent die besagten Datenpaare mittels *State Charts* ab und verwertet diese über die Funktionen der *System Dynamics Library*. Daraus entsteht ein vom Produktionsplan abhängiger Lastgang, der den stündlichen Stromverbrauch der Fertigung dynamisch darstellt.



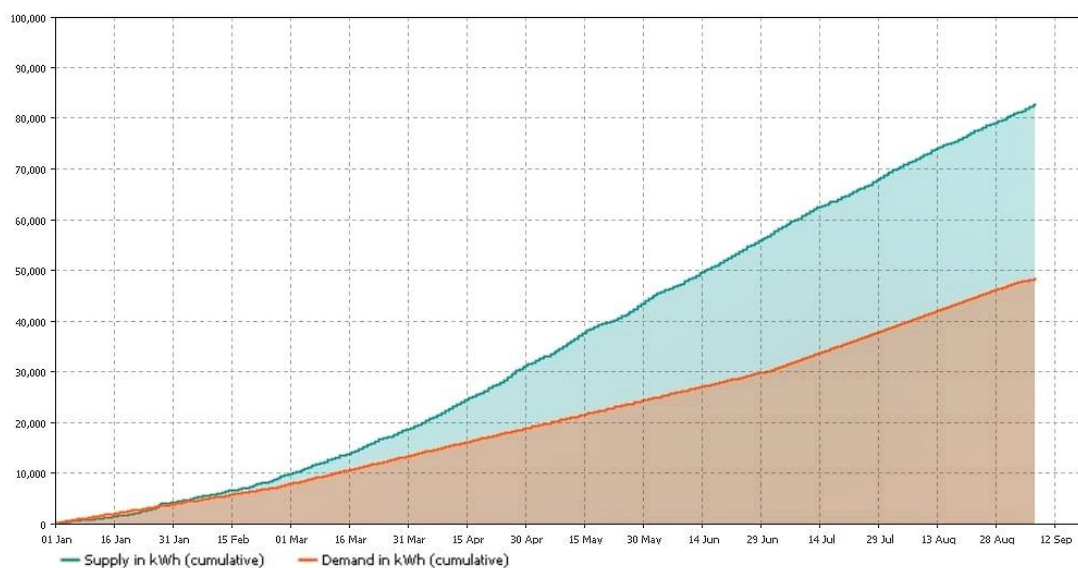
**Abbildung 33: Lastgang des Stromverbrauchs der 3D-Drucker-Herstellung**

Nachdem nun sowohl das Elektrizitätsangebot als auch die Elektrizitätsnachfrage über den Verlauf eines Jahres und in stündlicher Auflösung zu simulieren sind, können die dazugehörigen Kurven im nächsten Schritt miteinander verglichen werden, um letztendlich Aufschluss über die vorherrschenden Energieüberschüsse bzw. -defizite zu erhalten. Dazu wird der Output der bisher implementierten Agenten in einem zusätzlichen Angebot-Nachfrage-Agent vereint. Präzisiert bedeutet dies, dass eine gleichzeitige Simulation der produzierten und verbrauchten Elektrizität erfolgt und in einem Diagramm miteinander verglichen wird. Dieser Vergleich ist im oberen Teil der Abbildung 34 dargestellt. Wie zu erkennen ist, entsteht sowohl durch den volatilen Charakter der erneuerbaren Energiequellen als auch durch die sich ändernde Kapazität der Fertigung ein Überschuss bzw. Defizit an Elektrizität im gesamten Unternehmenssystem. Der untere Graph der Abbildung 34 zeigt, zu welchen Zeiten und in welcher Ausprägung diese Überschüsse bzw. Defizite auftreten. Gleichzeitig ermöglicht der Angebot-Nachfrage-Agent die kumulierte Gegenüberstellung der Stromproduktion mit dem Stromverbrauch. So kann, wie in Abbildung 35 der Fall, zu jedem beliebigen Zeitpunkt

einer Simulation überprüft werden, wie viel Strom bereits erzeugt bzw. konsumiert wurde. Allgemein spielt der Angebot-Nachfrage-Agent damit eine klare Schlüsselrolle für die Implementierung des Main-Agenten, der als Herzstück der gesamten Simulation zu verstehen ist und im folgenden Abschnitt detailliert beschrieben wird.



**Abbildung 34: Abgleich von Stromangebot und -nachfrage (oben) und daraus resultierende Überschüsse bzw. Defizite (unten)**



**Abbildung 35: Stromangebots- und nachfragekurve im Vergleich**

Der Main-Agent ist, genau wie die bisher beschriebenen Agenten, eine Verknüpfung einer *State Chart* mit den Elementen der *System Dynamics Library* und somit als Hybrid aus *Discrete Event*- und *System Dynamics*-Paradigma anzusehen. Das Ziel dieses Agenten ist es einerseits, das Angebot-Nachfrage-Verhältnis aus Abbildung 34 stündlich zu evaluieren und zu entscheiden, ob der Überschuss bzw. das Defizit an elektrischer Energie mit Hilfe eines Stromspeichers bestimmter Kapazität auszugleichen ist. Andererseits soll automatisiert beurteilt werden, in welchem Umfang Elektrizität ins öffentliche Stromnetz abgegeben werden kann bzw. aus dem öffentlichen Stromnetz bezogen werden muss. Der genaue Entscheidungsvorgang beruht dabei auf dem in Abbildung 36 dargestellten Java-Code, der in einer *Transition* der *State Chart* gespeichert und während der Simulation stündlich durchlaufen wird.

```

if(excess_deficit > 0){
    v_excess = (double) excess_deficit;
    v_deficit = 0;
}else{
    v_deficit = (double) excess_deficit;
    v_excess = 0;
}
if(batCapacity - batteryLevel >= v_excess){
    v_batExcess = v_excess;
    v_gridExcess = 0;
}else{
    v_gridExcess = v_excess;
    v_batExcess = 0;
}
if(batteryLevel >= (v_deficit*(-1))){
    v_batUnload = (v_deficit*(-1));
    v_gridInput = 0;
}else{
    v_gridInput = (v_deficit*(-1));
    v_batUnload = 0;
}
if(pro_Process.proDemandStock != 0.0){
    v_selfSufficiency = 1-(gridImportStock/pro_Process.proDemandStock);
}else{
    v_selfSufficiency = 0;
}
if(supply_demand.productionTotalStock != 0.0){
    v_ownConsumption = ((supply_demand.productionTotalStock-gridExportStock)/supply_demand.productionTotalStock);
}else{
    v_ownConsumption = 0;
}
if(supply_demand.demandTotalStock != 0.0){
    v_savedElectricityImport = supply_demand.demandTotalStock*self_sufficiency;
}else{
    v_savedElectricityImport = 0;
}
}

```

Abbildung 36: Programmcode zur Beschreibung des Main-Agenten

Der eben verdeutlichte Programmcode kontrolliert zuerst anhand des Vorzeichens der in Abbildung 34 dargestellten Excess/Deficit-Kurve, ob ein Stromüberschuss oder Stromdefizit vorhanden ist. Darauf aufbauend bestimmt er, mit Hilfe des Ladestands des dezentralen Batteriespeichers, ob der vorhandene Überschuss in den

Stromspeicher geladen werden kann bzw. ob das gegenwärtige Defizit aus dem Stromspeicher zu decken ist. Ist dies in beiden Fällen nicht möglich, so veranlasst der Programmcode das System dazu, den Überschuss ins öffentliche Stromnetz abzugeben. Analog dazu wird auch der Strom für das zu deckende Defizit aus dem Netz bezogen. Grundsätzlich kann der Batteriespeicher für diese Vorgänge in seiner Kapazität vom Benutzer beliebig gestaltet werden. Des Weiteren zeigt Abbildung 37 dazu einen Ausschnitt aus der Simulation des Main-Agenten. Die eben beschriebenen Vorgänge sind im oberen Teil der Abbildung nochmals nachzuvollziehen. Im unteren Teil werden weiterführend verschiedene Outputs generiert, die für die Interpretation und Bewertung des simulierten Systems von entscheidender Bedeutung sind. Die Werte dieser Outputs sind während eines Simulationsdurchgangs, welcher ein komplettes Jahr in circa 15 Minuten durchläuft, durch diverse Graphen in Echtzeit zu verfolgen (vgl. Abbildung 38 und 39).

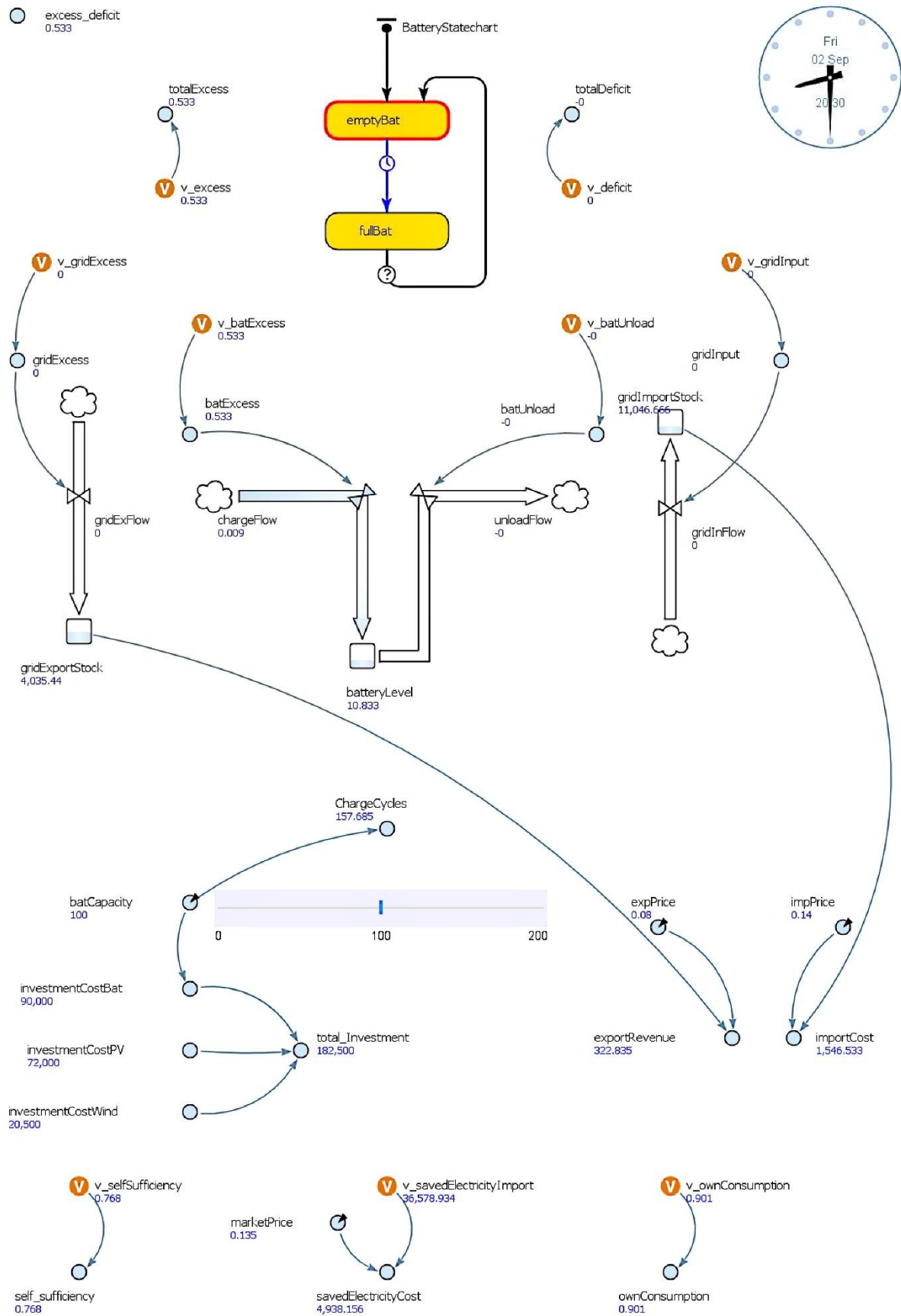


Abbildung 37: Implementierte Systematik des Main-Agenten in Anylogic®

## Visualisierung der Ergebnisse und Benutzeroberfläche

Auf Basis der in Abbildung 38 und 39 gezeigten Graphen erhält der Benutzer, sowohl während als auch zum Ende eines Simulationsdurchlaufs, Aufschluss über den prozentual erreichten Eigenverbrauchsanteil, den Autarkiegrad, die ins öffentliche Netz eingespeiste Strommenge, die Anzahl der Batterieladezyklen und nicht zuletzt die aus dem öffentlichen Netz bezogene Strommenge. Außerdem kann der aktuelle Ladestand des Batteriespeichers in Echtzeit mitverfolgt werden. Um Missverständnisse im Hinblick auf die Interpretation der Ergebnisse zu vermeiden, wird hiermit nochmal kurz darauf eingegangen, wie die Begriffe „Eigenverbrauchsanteil“ und „Autarkiegrad“ in dieser Simulation definiert sind. Der Eigenverbrauchsanteil, hier als *Internal consumption level* bezeichnet, ist prinzipiell der Anteil des selbst genutzten Stroms am eigens und dezentral produzierten Strom. Der Autarkiegrad, auch *Selfsufficiency* genannt, ist hingegen der Anteil des selbst produzierten und genutzten Stroms am gesamten Stromverbrauch des Unternehmens. In Abschnitt 3.4.3 wird dazu nochmal genauer erklärt, mit welchen Zielstellungen diese Begriffe verbunden sein können.



Abbildung 38: Anzahl der Batterieladezyklen (oben) und variabler Ladestand des Batteriespeichers (unten)

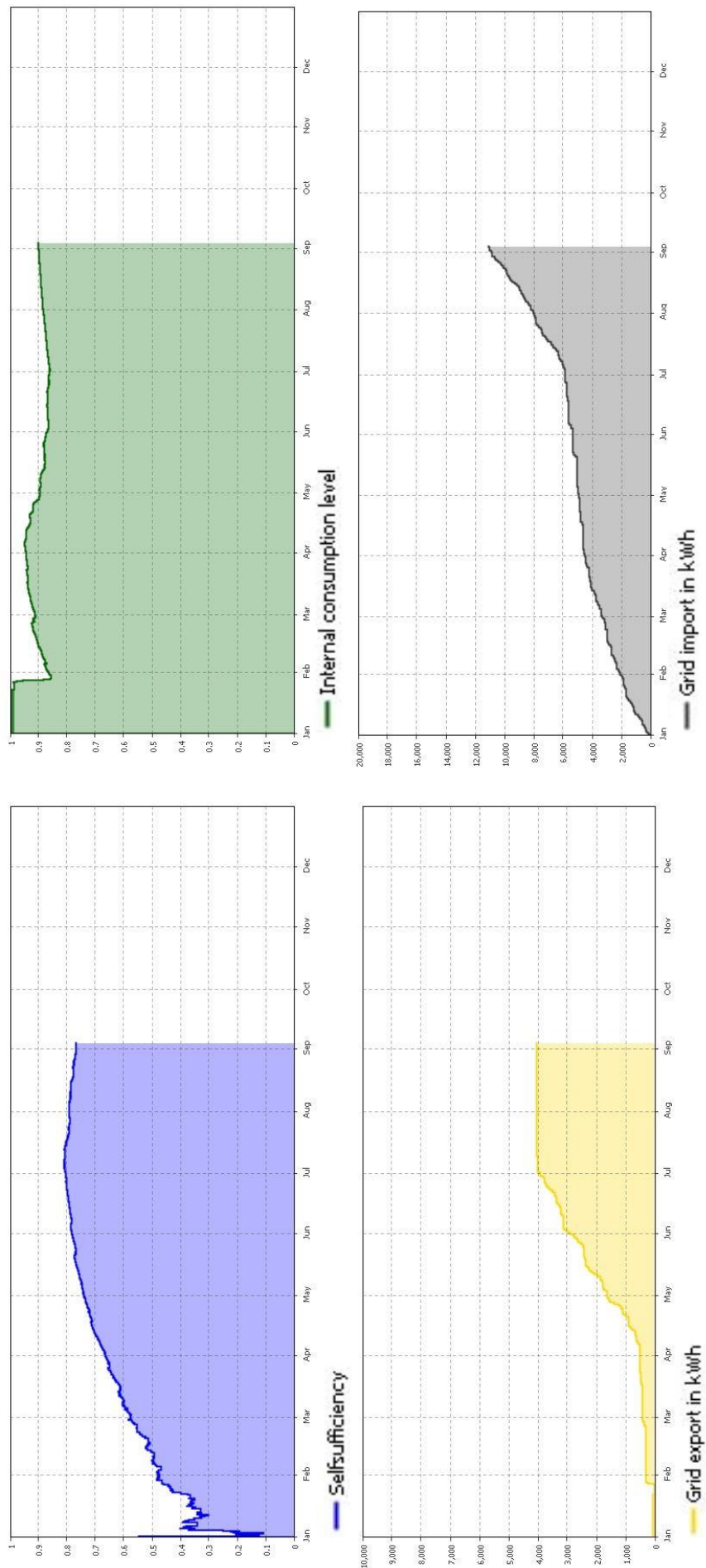


Abbildung 39: Autarkiegrad (blau), Eigenverbrauchsanteil (grün), Einspeisung in das öffentliche Stromnetz (gelb), Bezug aus dem öffentlichen Stromnetz (grau)

Geknüpft an die eben beschriebenen Output-Größen bietet das Programm weitreichende Möglichkeiten die Eingangsparameter der Simulation nach individuellen Präferenzen der Unternehmen festzulegen. Neben der gewünschten Leistung bzw. Kapazität der PV-, Kleinwindkraft-, und Batteriespeichieranlagen können auch finanzielle Einflüsse, wie beispielsweise die vorherrschenden Einspeisetarife oder Marktstrompreise nach Belieben fixiert werden. Dies muss allerdings immer vor dem Start eines Simulationsdurchgangs erfolgen. Die Änderung einer dieser Größen verläuft, ungeachtet ihres Charakters, immer gemäß des folgenden Schemas. Nachdem entschieden wurde welcher Parameter anzugleichen ist, öffnet der Benutzer den Agent, der die jeweilige Zielgröße enthält und legt diese über ein Eingabefenster manuell fest. Für die PV-Anlage ist dies beispielsweise die zur Verfügung stehende Dachfläche, während für die Kleinwindkraftanlage der gewünschte Rotordurchmesser bestimmt werden muss.

Zur Anwendung des Simulationstools wurde die in Abbildung 40 gezeigte Benutzeroberfläche entworfen, die als zentrales Analysewerkzeug der Planung einer dezentralen, erneuerbaren Energieversorgung für die entsprechenden Unternehmen fungiert. Neben der Echtzeitanalyse diverser Zielgrößen bietet sie dem Benutzer die Möglichkeit eine schnelle Übersicht über die momentane Anlagenkonfiguration und Tarifsituation zu erlangen. Der Ablauf der Simulation kann mit verschiedenen Geschwindigkeiten erfolgen, sodass der Benutzer über den Verlauf eines gesamten Jahres die Chance hat, stundengenaue Analysen durchzuführen. Am Ende eines Simulationsdurchgangs werden die jährlich erreichten Resultate in einem Ausgabefenster (oben links) präsentiert. Dieses Ausgabefenster dient als zentraler Input für die durchgeführten Szenarien. Auf Basis der daraus gewonnenen Informationen ist einerseits abzuschätzen, in welcher Ausführung die erneuerbaren Erzeugungsanlagen installiert werden müssen, um eine gewisse Stromnachfrage zu decken und mit welchen finanziellen Konsequenzen dies gleichzeitig verbunden sein kann. Andererseits hilft das Simulationstool durch seinen visuellen Charakter dabei, die diversen Potenziale zur besseren Abstimmung der Energienachfrage mit dem zur Verfügung stehenden Energieangebot aufzuspüren.

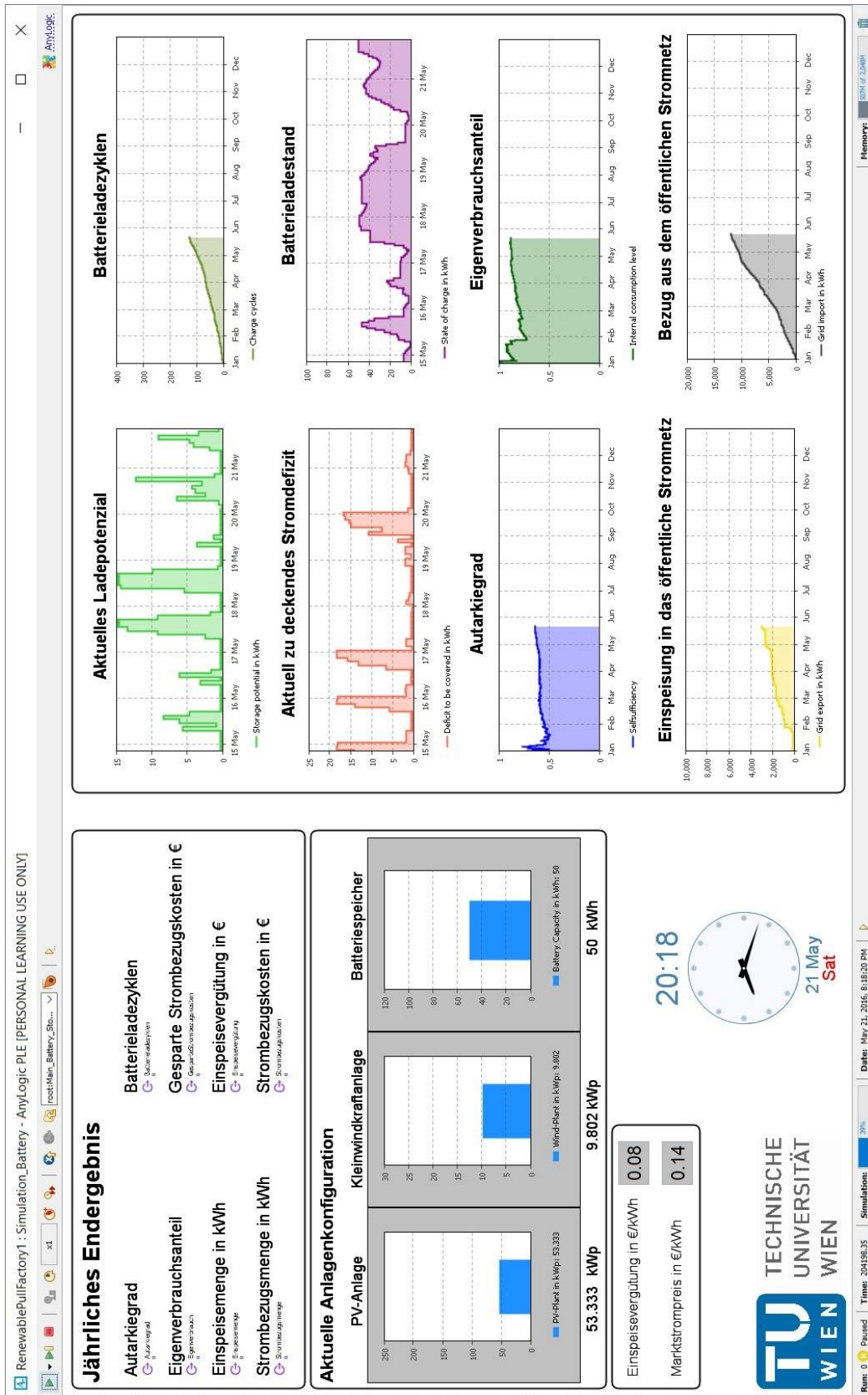


Abbildung 40: Benutzeroberfläche während eines Simulationsdurchgangs

### 3.4.3 Ergebnisse

#### Betrachtete Zielgrößen

Über die Kombination der Unternehmensausführungen U1-U5 mit den Produktionsplänen P1-P5 ergeben sich 25 mögliche Simulationsdurchläufe deren Ergebnisse in Abbildung 48 des Anhangs zusammengefasst sind. Pro Durchlauf wurden die Ergebnisse zu folgenden Größen erfasst:

- Autarkie
- Eigenverbrauch
- Gesparte Strombezugskosten
- Strom-Bezug (Import aus dem öffentlichen Stromnetz)
- Strom-Verkauf (Einspeisung in das öffentliche Stromnetz)

Bis auf die gesparten Strombezugskosten wurden alle Größen bereits im Kapitel 3.4.2 näher beschrieben. Grundsätzlich soll diese Größe dem Benutzer dabei helfen abzuschätzen, welche finanziellen Konsequenzen die betrachtete U-P-Kombination im Vergleich zur zentralen Stromversorgung auf ein Jahr gesehen birgt. Über den jeweiligen Marktstrompreis steht sie in direkter Verbindung mit dem Autarkiegrad. Die gesparten Strombezugskosten entstehen dadurch, dass aufgrund der eigenen, dezentralen Stromerzeugung ein gewisser Anteil der internen Stromnachfrage nicht mehr aus dem öffentlichen Stromnetz gedeckt werden muss. Diese Größe ist beispielsweise dann heranzuziehen, wenn die Amortisationszeit eines geplanten Systems zu berechnen ist.

#### Quantitative Beobachtungen

Um die Resultate der zahlreichen Simulationsdurchgänge nun zu präzisieren und besser vergleichen zu können, wurden die zentralen Größen der Autarkie und des Eigenverbrauchs sowohl im Kontext der unterschiedlichen Unternehmenskonfigurationen als auch der geschilderten Produktionspläne in sog. Netzdiagramme übertragen (vgl. Abbildung 41 und 42). Auf Basis der Diagramme zur Autarkie und zum Eigenverbrauch sind folgenden Beobachtungen festzuhalten.

Den höchsten Wert für den Anteil des selbst produzierten und genutzten Stroms am gesamten Stromverbrauch der Fertigung (Autarkiegrad) erreicht die Kombination aus Unternehmen U1 und Produktionsplan P5. Gleichzeitig ist zu erkennen, dass mit P3 und U4 die niedrigsten Autarkiewerte verwirklicht werden. Produktionsplan P2 lässt bei

vergleichbaren Lieferzeiten nur etwa 35% der Lagerbestände von P3 zu, setzt aber standardisiert auf Wochenendarbeit und erreicht damit im Schnitt eine etwa 9,5% höhere Autarkie. Bei weiterem Vergleich des Autarkiegrads von P2 und P5 fällt auf, dass sich dessen Werte, speziell bei abnehmender Anlagen- und Speichergröße, zum Vorteil von P2 entwickeln. Außerdem zeigen die Netzdiagramme für die Produktionspläne P1 und P4 annähernd identische Werte hinsichtlich des erreichten Autarkiegrades. Im Schnitt liegen diese etwa 2,5 Prozentpunkte über den Werten von P3. Für das Unternehmen U2 verursachen die unterschiedlichen Produktionspläne die größte Spanne an Autarkiewerten. Zwischen dem niedrigsten und höchsten Wert liegen hierbei 14,5%. Am wenigsten Wirkung zeigen die verschiedenen Produktionspläne auf das Unternehmen U4. Die Spanne der Autarkiewerte beträgt in diesem Fall nur 7,2%. Allgemein bewegen sich die Werte bezüglich der erreichten Autarkie in einem Bereich von 22,3% (P3 mit U4) bis 96,3% (P5 mit U1).

Steht die Autarkie als ein Maß für die energetische Unabhängigkeit jedoch nicht im Vordergrund, sondern geht es den Unternehmen primär um die möglichst effiziente Nutzung des selbst produzierten Stroms, so ist der Eigenverbrauchsanteil die zu optimierende Zielgröße. Aus den Simulationsszenarien konnte dazu festgestellt werden, dass über die Kombination von P2 und U4 das Maximum des Eigenverbrauchs realisiert wird. Mit einem Wert von 99,2% wird damit annähernd die gesamte intern produzierte Elektrizität auch selbst durch das Unternehmen verbraucht. Im Kontrast dazu steht die Verknüpfung von P3 und U1. Mit nur 32,2% liefert sie das Minimum aller erzeugten Werte. Die im Vergleich von P2 und P3 erzielten Unterschiede sind im Hinblick auf den Eigenbrauch noch deutlicher zu erkennen als bei den Diagrammen zur Autarkie. Im Durchschnitt betragen diese hierbei rund 13,5%. Ferner zeigen die Produktionspläne P1 und P4, unabhängig von der betrachteten Unternehmenskonfiguration, auch für den Eigenverbrauch nahezu identische Werte. Im Schnitt liegen diese etwa 4 Prozentpunkte über den Werten von P3. Die größte Spanne hinsichtlich des Eigenverbrauchs verursachen die diversen Produktionspläne für das Unternehmen U4. Zwischen P2 und P3 liegen in diesem Fall ganze 24,5%. Die geringste Wirkung zeigen die verschiedenen Produktionspläne, mit einer Spanne von knapp 3%, auf das Unternehmen U1. Im Gesamten liegen die Werte hinsichtlich des erreichten Eigenverbrauchs in einem Bereich von 32,2% (P3 mit U1) bis 99,2% (P2 mit U4).

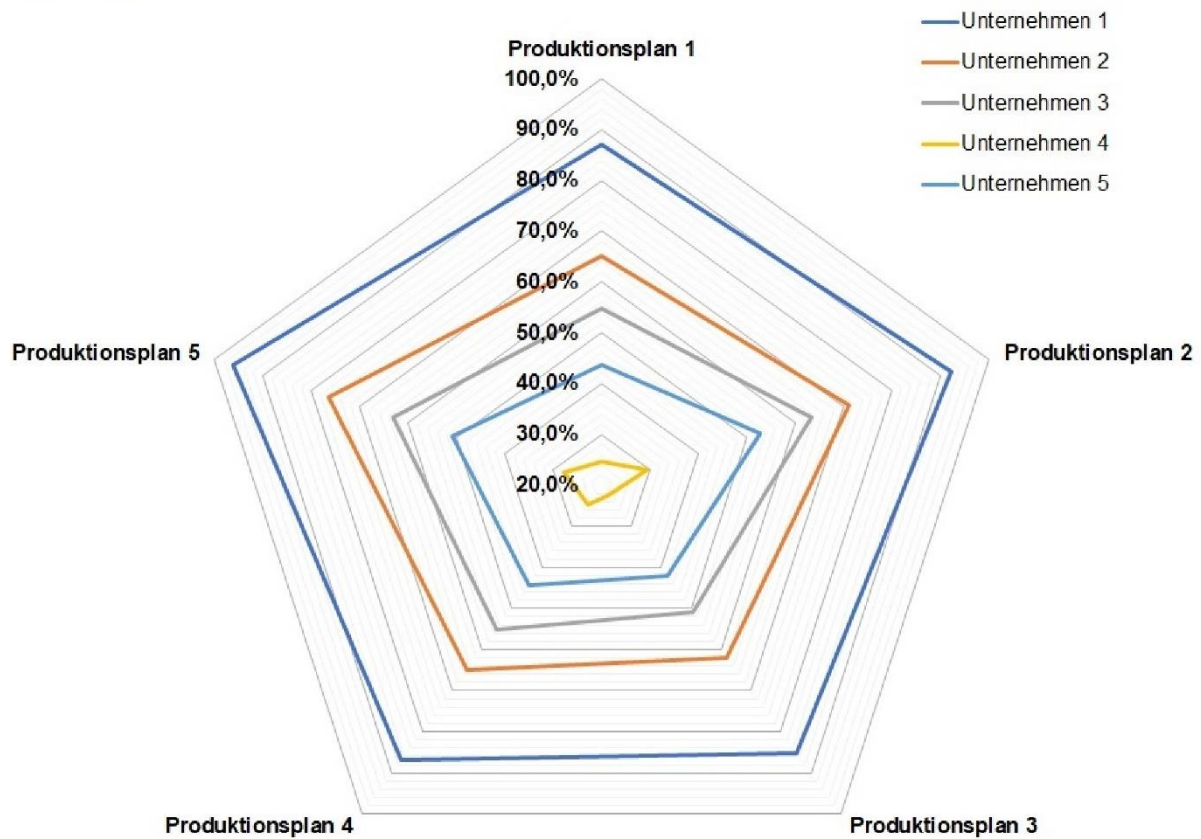
## Interpretation der Beobachtungen

Den generierten Resultaten zufolge wird die maximale Autarkie erreicht, sobald die Erzeugungs- und Speicheranlagen überdurchschnittlich groß dimensioniert und mit einem sehr flexiblen, energieangebotsorientierten Produktionsplan kombiniert werden. Flexibilität in der Produktion bedeutet im Kontext der Simulation, dass sich sowohl die Schicht- und Taktorganisation als auch die Einführung der Wochenendarbeit an der Wettervorhersage und damit dem potenziell zur Verfügung stehenden Energieangebot orientiert. Paart man im Kontrast dazu deutlich kleinere Erzeugungs- und Speicheranlagen mit sehr starr organisierten Produktionsplänen, sind hinsichtlich der energetischen Unabhängigkeit nur relativ schwache Ergebnisse zu erwarten. Im Falle der obigen Szenarien bedeutet eine starre Organisation beispielsweise eine zwingende Produktionspause an den Wochenenden oder ein durchgehend gleicher Wochenablauf. Die festgelegten Limitierungen bei den Lieferzeiten scheinen grundsätzlich für das Erreichen eines möglichst hohen Autarkiegrades nicht ausschlaggebend zu sein, solange die Möglichkeit besteht den Lagerbestand zwischenzeitlich zu erhöhen. Das im Vergleich deutlich über dem Durchschnitt liegende Ergebnis von P2 unterstützt diese Vermutungen. Zusammenfassend sind die geschilderten Beobachtungen Grund zu folgender Annahme. Zielt ein Unternehmen darauf ab, energetisch so unabhängig wie möglich zu sein, so muss dies nicht auf Kosten der Lieferzeiten bzw. auf Basis enormer Lagerbestände durchgesetzt werden. Überdurchschnittlich hohe Autarkiewerte können auch über standardisierte Wochenendarbeit und die damit verbundene Einführung einer zweiten Schicht erreicht werden. Durch die zusätzliche Intensivierung des Takts um die Mittagszeit, lässt sich das zur Verfügung stehende Energieangebot optimal ausnutzen. Im Hinblick auf die ökologischen Aspekte aus Kapitel 3.3.2 kann damit folglich behauptet werden, dass die an einen hohen Autarkiegrad geknüpfte Verminderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen nicht zu Lasten der Lieferzeiten bzw. der Lagerbestände erfolgen muss. Schafft es ein Produktionsplan das natürliche Energieangebot optimal mit zusätzlichen Schichten und Takterhöhungen über den gesamten Wochenverlauf zu nutzen, so können auch auf Basis dezentraler, erneuerbarer Erzeugungsanlagen kurze Lieferzeiten und geringe Lagerbestände verwirklicht werden, während gleichzeitig ein Beitrag zur Reduktion des CO<sub>2</sub>-Austoßes geleistet wird. Dies gilt auch für Unternehmen, die in ihren Ausgaben limitiert sind und darum nicht in einen Batteriespeicher investieren können. Unternehmen U5 bestätigt in diesem Zusammenhang, dass auch auf Basis von kleineren Erzeugungsanlagen und flexiblen Produktionsplänen

beachtliche Autarkiewerte von über 50% erreicht werden können. Sollen jedoch Autarkiewerte jenseits der 80% erreicht werden, ist eine überdurchschnittlich große Dimensionierung der Erzeugungs- und Speicheranlagen unabdingbar. Der Vergleich von U1 mit U2 unterstützt diese Behauptung sehr deutlich.

Den Eigenverbrauchsanteil betreffend lassen sich auf Basis der quantitativen Beobachtungen nun folgende Aussagen konstatieren: Um einen möglichst großen Anteil des selbst produzierten Stroms vor Ort nutzen zu können, ist die präzise Abstimmung der PV- und Kleinwindkraftanlagen auf den realen Stromverbrauch des Unternehmens grundlegend von entscheidender Bedeutung (Im Falle der betrachteten 3D-Drucker-Herstellung ist dazu von einem jährlichen Stromverbrauch von ca. 70 000 kWh auszugehen). Demzufolge sollte auch der Batteriespeicher in seiner Kapazität nicht überdimensioniert sein. Untermauert werden diese Behauptungen durch den Vergleich von U4 mit U2. Im Schnitt erreicht Unternehmen U4 einen knapp 30% höheren Eigenverbrauchsanteil als U2 und ist damit aus Sicht der verlustfreien Nutzung der dezentral erzeugten Elektrizität entscheidend effizienter. Wie im Falle des Autarkiegrades, ist auch in den Ergebnissen bezüglich des Eigenverbrauchs zu erkennen, dass mittels flexibler, energieangebotsorientierter Produktionspläne die besten Resultate erzielt werden. Auch hier muss eine besonders effiziente Nutzung der vor Ort produzierten Elektrizität nicht auf Kosten der kurzen Lieferzeiten bzw. niedrigen Lagerbestände durchgesetzt werden. Die im Vergleich mittels P2 erreichten Eigenverbrauchsanteile belegen diese Behauptungen eindeutig. Noch dazu verhindert die möglichst optimale Nutzung der „eigenen“ Energie, dass große Elektrizitätsüberschüsse unkontrolliert ins öffentliche Stromnetz eingespeist werden und dieses dadurch zunehmend überlasten (vgl. Kapitel 2.1.1). Auch hier kann deswegen abschließend Folgendes zusammengefasst werden: Kann ein Produktionsplan das natürliche Energieangebot effizient mit zusätzlichen Schichten und Takterhöhungen über den gesamten Wochenverlauf nutzen, so gelingt es auch mittels dezentraler, erneuerbarer Erzeugungsanlagen kurze Lieferzeiten und niedrige Lagerbestände zu realisieren, während die Entlastung der öffentlichen Stromnetze vorangetrieben wird.

## Autarkie



## Eigenverbrauch

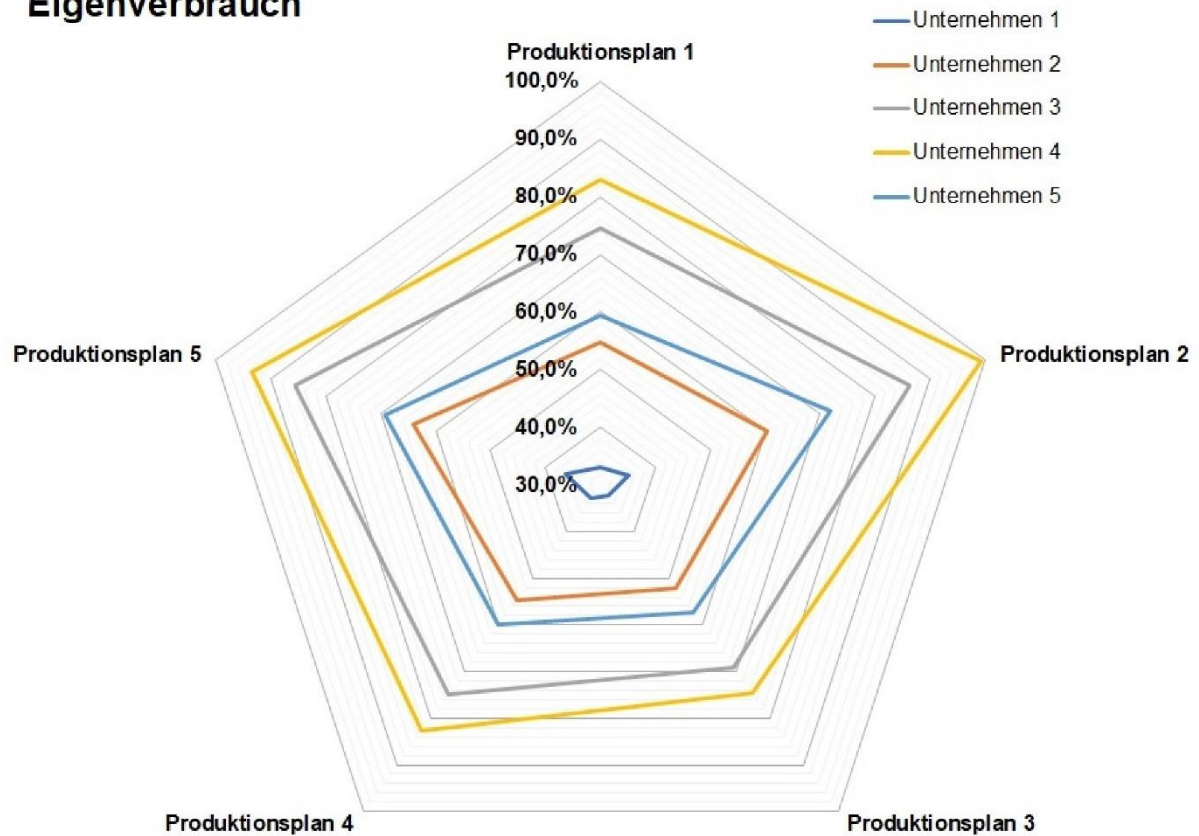
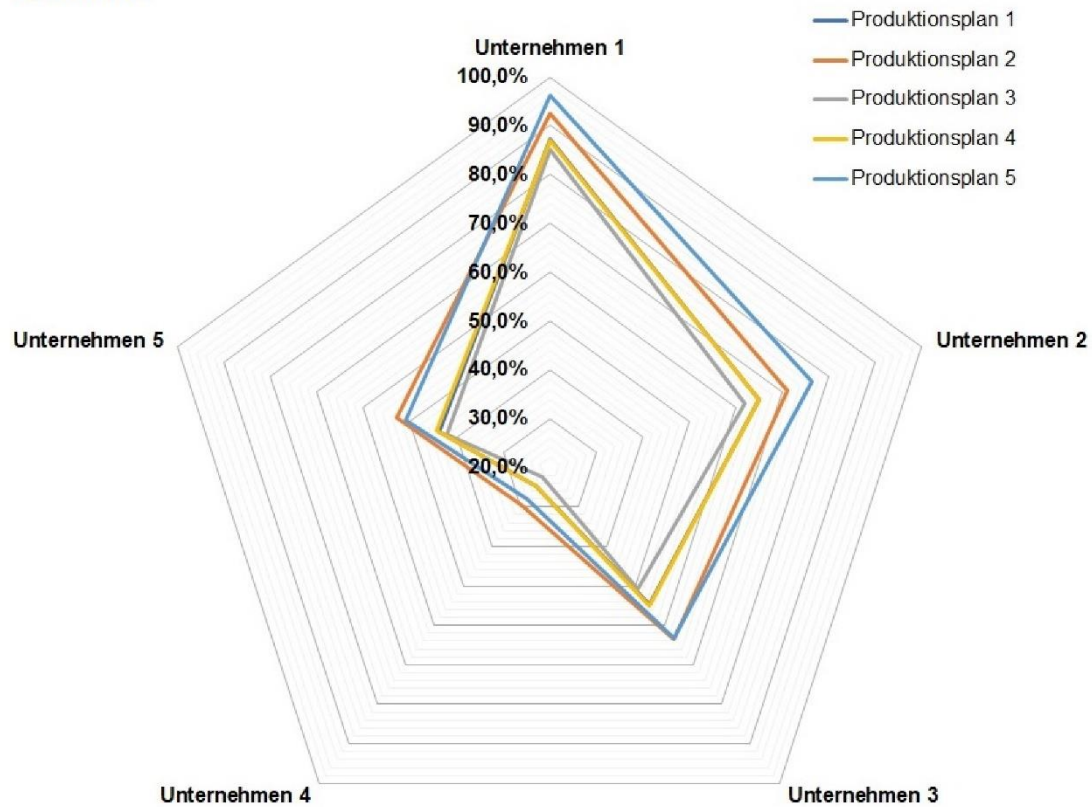


Abbildung 41: Netzdiagramme zu Autarkie und Eigenverbrauch mit Fokus auf Unterschiede zwischen den Unternehmen U1 bis U5

## Autarkie



## Eigenverbrauch

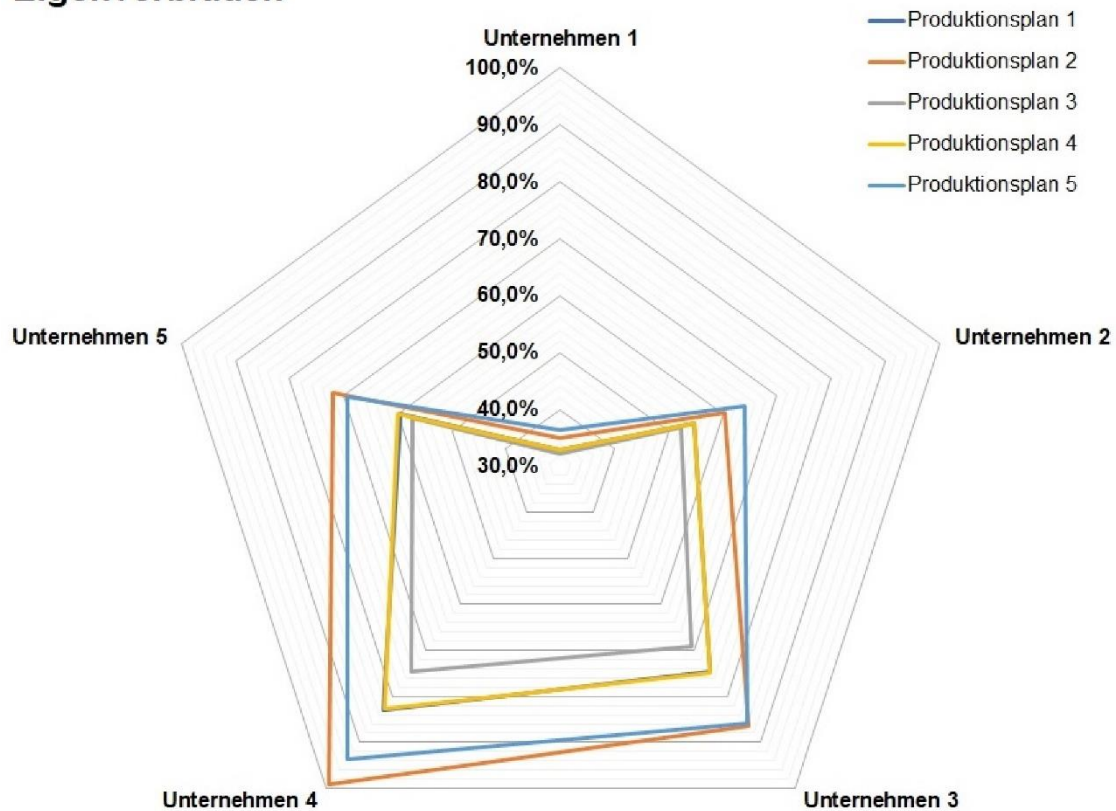


Abbildung 42: Netzdiagramme zu Autarkie und Eigenverbrauch mit Fokus auf Unterschiede zwischen den Produktionsplänen P1 bis P5

### **Anwendungsflexibilität am Beispiel der Grundlast**

Um die flexiblen Anwendungsmöglichkeiten des implementierten Simulationstools abschließend noch einmal zu verdeutlichen, wird hiermit exemplarisch auf die Berücksichtigung einer potenziellen Grundlast in den betrachteten Unternehmen eingegangen. Dazu wurde angenommen, dass der Energiebedarf der Produktionspläne P1 bis P5 generell mit einer festen Grundlast von 2 kW belastet wird. Um diese Annahme in die Simulation zu integrieren musste lediglich die in Abbildung 28 (B) dargestellte Inputdatei angeglichen werden. Der jährliche Stromverbrauch der Produktion stieg infolgedessen auf rund 85 000 kWh. Die auf Basis dieser Änderung erzeugten Ergebnisse können in den Abbildungen 49, 50 und 51 gesondert nachvollzogen werden. Allgemein ist darin zu beobachten, dass die Anwesenheit einer Grundlast einerseits negative Auswirkungen auf den durchschnittlich erreichten Autarkiegrad hat, andererseits aber positive Effekte für den realisierten Eigenverbrauchsanteil mit sich bringt. Für die betroffenen Unternehmen bedeutet dies konsequenterweise, dass es unter Existenz einer Grundlast tendenziell aufwändiger ist eine hohe energetische Unabhängigkeit zu erreichen. Gleichzeitig kann in diesem Fall aber erwartet werden, dass die dezentral produzierte Elektrizität noch effizienter genutzt werden kann als ohne die Präsenz einer Grundlast.

## 4 Schlussfolgerung und Ausblick

In diesem abschließenden Kapitel wird das selbstständig entwickelte Simulationsprogramm zuerst zusammenfassend bewertet und auf die Erfüllung der vorab definierten Zielvorstellung überprüft. Unterdessen sollen auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse der Arbeit möglichst resümierende Schlussfolgerungen dargelegt werden. Im darauffolgenden Teil stehen die Grenzen der Arbeit im Vordergrund und es wird zusätzlich ein Ausblick hinsichtlich möglicher Weiterentwicklungen des implementierten Systems präsentiert.

Eines der zentralen Ziele der Diplomarbeit war es, ein Simulationsprogramm zu entwickeln, das als unterstützendes Werkzeug bei der Planung von kombinierten EM/PPS-Systemen eingesetzt werden kann und auf diese Weise auch von real existierenden Unternehmen zu nutzen ist. Wie im Falle der Anwendung auf die 3D-Drucker-Herstellung der Pilotfabrik Industrie 4.0 demonstriert wurde, eignet sich das Simulationstool vor allem dazu, das Zusammenspiel von individuellen Produktionsplänen und dem auf erneuerbaren, dezentralen Erzeugungs- und Speichersystemen basierenden Energieangebot detailliert zu beleuchten und aktiv zu gestalten. Die in Kapitel 3.4.3 dargestellten Forschungsergebnisse unterstreichen den Nutzen des Simulationstools und sprechen damit für das Erreichen der angesprochenen Zielvorstellungen auf diesem Gebiet. Die Kernaussage dieser Forschungsergebnisse kann dazu wie folgt zusammengefasst werden:

Vollbringt es ein Produktionsplan das natürliche Energieangebot flexibel und optimal zu nutzen, so können auch auf Grundlage von dezentralen, erneuerbaren Energieerzeugungsanlagen kurze Lieferzeiten und niedrige Lagerbestände realisiert werden, während gleichzeitig ein Beitrag zur Reduktion des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes geleistet wird. Die im einleitenden Kapitel bereits angesprochene Rolle der Energie als essentieller Produktionsfaktor mit großer Auswirkung auf die Zielgrößen des Produktionsmanagements der Unternehmen konnte damit bestätigt werden.

Des Weiteren konnten die Erwartungen hinsichtlich der systematischen Darstellung der Anforderungen an kombinierte EM/PPS-Systeme klar erfüllt und über die in Abbildung 18 gezeigte *Concept Map* besonders anschaulich zusammengefasst werden. In Bezug auf die systematische Darstellung verschiedener Lösungsansätze für die vereinte Implementierung von Energiemanagement und PPS konnten ebenfalls

aussagekräftige Resultate erzielt werden. Aufgrund der Komplexität und inhaltlichen Breite der gefundenen Lösungskonzepte erschien es hierbei jedoch nicht sinnvoll, die Resultate starr zu kategorisieren und in einer *Concept Map* zu präsentieren.

Grundsätzlich sollte außerdem nochmals betont werden, dass die Simulation primär als flexibles, generisches Konzeptmodell agiert und weniger als spezifisches Lösungsmodell anzuwenden ist. Diese bewusst gewählte Ausrichtung beruhte auf folgender Tatsache: Im Bereich der erneuerbaren, dezentralen Energieversorgung der Industrie besteht seitens der Unternehmen die Möglichkeit, die Implementierung der Versorgungs- und Speichersysteme auf Basis einer Vielzahl von Beweggründen durchzuführen. Das optimale Lösungskonzept ist dabei immer eng mit den individuellen Zielgrößen dieser Beweggründe verbunden. Wie in Abbildung 29 bereits dargestellt wurde, kann die Motivation ihren Ursprung beispielsweise sowohl in gewissen Nachhaltigkeitsstandards oder „grünen“ Unternehmensimages haben als auch durch klare ökonomische Ziele oder Autarkie- und Effizienzbestrebungen entstehen. Je nach vorherrschender Zielvorstellung würde die Konfiguration der PV-, Windkraft- und Batteriespeichieranlagen deswegen stark differieren und könnte mit der vorliegenden Simulation nur schwer auf ein objektives Optimum gebracht werden. Die Möglichkeit der generischen Anwendung des Simulationsprogramms bietet den Unternehmen aber die Chance, ungeachtet ihrer Motivation ein erstes grundlegendes Planungskonzept zu enthüllen und Aufschluss über diverse Lösungsansätze zu erhalten. Um jedoch unternehmensspezifisch die optimale Lösung simulieren zu können, müsste das entwickelte Programm entscheidend ausgebaut werden. Eine Weiterentwicklung läge beispielsweise in der Berücksichtigung zusätzlicher Input-Parameter wie dem möglichen Investitionsvolumen, den angestrebten Amortisationszeiten oder auch den vorgegebenen Durchlaufzeiten der Produktion.

In weiterem Bezug auf die Grenzen und Weiterentwicklungsmöglichkeiten der Diplomarbeit muss zudem angesprochen werden, dass die Optimierungsfunktion von *Anylogic*® einen äußerst interessanten Ansatzpunkt für weiterführende Forschungsaktivitäten darstellt. Über die verstärkte Nutzung dieser Programmfunktion könnte eine Entwicklung des bestehenden generischen Planungstools hin zu einem spezifisch anwendbaren Lösungswerkzeug erfolgen. Wie in einem kurzen Versuch in *Anylogic*® festgestellt werden konnte, würde dies jedoch einen erheblich höheren Rechenaufwand für das Programm bedeuten.

Schlussendlich werden sich auch durch die technische Weiterentwicklung der Erzeugungs- und Speicheranlagen neue Spielräume für einen erneuerbaren Energiewandel in den Unternehmen eröffnen. Verknüpft mit der Entwicklung der energieorientierten Managementsysteme besteht damit zukünftig enormes Potenzial im Bereich der sauberen Energieversorgung der Industrie.

## 5 Anhang

|    | A             | B                       | C                                        | D                                            | E     | F     | G     | H     | I     | J     | K     | L                                         | M                             | N                     |
|----|---------------|-------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------------------------------------|-------------------------------|-----------------------|
|    | Woche<br>(KW) | Start<br>Datum<br>Woche | Auftragseingang<br>für Woche in<br>[Stk] | Produktionsmenge<br>für Woche in<br>[Stk/Wo] | Mo    | Di    | Mi    | Do    | Fr    | Sa    | So    | Wöchentlicher<br>Stromverbrauch<br>in kWh | Bestand für<br>Woche<br>[Stk] | Kum. Bestand<br>[Stk] |
| 1  | 1             | 01.01.2018              | 18                                       | 25                                           | 132   | 132   | 132   | 132   | 132   | 0     | 0     | 660                                       | 7                             | 7                     |
| 2  | 2             | 08.01.2018              | 25                                       | 25                                           | 132   | 132   | 132   | 132   | 132   | 0     | 0     | 660                                       | 0                             | 7                     |
| 3  | 3             | 15.01.2018              | 27                                       | 25                                           | 132   | 132   | 132   | 132   | 132   | 0     | 0     | 660                                       | -2                            | 5                     |
| 4  | 4             | 22.01.2018              | 30                                       | 25                                           | 132   | 132   | 132   | 132   | 132   | 0     | 0     | 660                                       | -5                            | 0                     |
| 5  | 5             | 29.01.2018              | 25                                       | 25                                           | 132   | 132   | 132   | 132   | 132   | 0     | 0     | 660                                       | 0                             | 0                     |
| 6  | 6             | 05.02.2018              | 34                                       | 30                                           | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 0     | 0     | 792                                       | -4                            | -4                    |
| 7  | 7             | 12.02.2018              | 38                                       | 30                                           | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 0     | 0     | 792                                       | -8                            | -12                   |
| 8  | 8             | 19.02.2018              | 36                                       | 30                                           | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 0     | 0     | 792                                       | -6                            | -18                   |
| 9  | 9             | 26.02.2018              | 32                                       | 50                                           | 264   | 264   | 264   | 264   | 264   | 0     | 0     | 1320                                      | 18                            | 0                     |
| 10 | 10            | 05.03.2018              | 45                                       | 50                                           | 264   | 264   | 264   | 264   | 264   | 0     | 0     | 1320                                      | 5                             | 5                     |
| 11 | 11            | 12.03.2018              | 53                                       | 50                                           | 264   | 264   | 264   | 264   | 264   | 0     | 0     | 1320                                      | -3                            | 2                     |
| 12 | 12            | 19.03.2018              | 46                                       | 50                                           | 264   | 264   | 264   | 264   | 264   | 0     | 0     | 1320                                      | 4                             | 6                     |
| 13 | 13            | 26.03.2018              | 40                                       | 50                                           | 264   | 264   | 264   | 264   | 264   | 0     | 0     | 1320                                      | 10                            | 16                    |
| 14 | 14            | 02.04.2018              | 43                                       | 30                                           | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 0     | 0     | 792                                       | -13                           | 3                     |
| 15 | 15            | 09.04.2018              | 50                                       | 50                                           | 264   | 264   | 264   | 264   | 264   | 0     | 0     | 1320                                      | 0                             | 3                     |
| 16 | 16            | 16.04.2018              | 46                                       | 50                                           | 264   | 264   | 264   | 264   | 264   | 0     | 0     | 1320                                      | 4                             | 7                     |
| 17 | 17            | 23.04.2018              | 41                                       | 50                                           | 264   | 264   | 264   | 264   | 264   | 0     | 0     | 1320                                      | 9                             | 16                    |
| 18 | 18            | 30.04.2018              | 45                                       | 30                                           | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 0     | 0     | 792                                       | -15                           | 1                     |
| 19 | 19            | 07.05.2018              | 54                                       | 50                                           | 264   | 264   | 264   | 264   | 264   | 0     | 0     | 1320                                      | -4                            | -3                    |
| 20 | 20            | 14.05.2018              | 47                                       | 50                                           | 264   | 264   | 264   | 264   | 264   | 0     | 0     | 1320                                      | 3                             | 0                     |
| 21 | 21            | 21.05.2018              | 50                                       | 50                                           | 264   | 264   | 264   | 264   | 264   | 0     | 0     | 1320                                      | 0                             | 0                     |
| 22 | 22            | 28.05.2018              | 49                                       | 50                                           | 264   | 264   | 264   | 264   | 264   | 0     | 0     | 1320                                      | 1                             | 1                     |
| 23 | 23            | 04.06.2018              | 48                                       | 50                                           | 264   | 264   | 264   | 264   | 264   | 0     | 0     | 1320                                      | 2                             | 3                     |
| 24 | 24            | 11.06.2018              | 51                                       | 50                                           | 264   | 264   | 264   | 264   | 264   | 0     | 0     | 1320                                      | -1                            | 2                     |
| 25 | 25            | 18.06.2018              | 52                                       | 50                                           | 264   | 264   | 264   | 264   | 264   | 0     | 0     | 1320                                      | -2                            | 0                     |
| 26 | 26            | 25.06.2018              | 49                                       | 50                                           | 264   | 264   | 264   | 264   | 264   | 0     | 0     | 1320                                      | 1                             | 1                     |
| 27 | 27            | 02.07.2018              | 72                                       | 70                                           | 264   | 264   | 264   | 264   | 264   | 264   | 264   | 1848                                      | -2                            | -1                    |
| 28 | 28            | 09.07.2018              | 71                                       | 70                                           | 264   | 264   | 264   | 264   | 264   | 264   | 264   | 1848                                      | -1                            | -2                    |
| 29 | 29            | 16.07.2018              | 78                                       | 70                                           | 264   | 264   | 264   | 264   | 264   | 264   | 264   | 1848                                      | -8                            | -10                   |
| 30 | 30            | 23.07.2018              | 66                                       | 70                                           | 264   | 264   | 264   | 264   | 264   | 264   | 264   | 1848                                      | 4                             | -6                    |
| 31 | 31            | 30.07.2018              | 63                                       | 70                                           | 264   | 264   | 264   | 264   | 264   | 264   | 264   | 1848                                      | 7                             | 1                     |
| 32 | 32            | 06.08.2018              | 78                                       | 70                                           | 264   | 264   | 264   | 264   | 264   | 264   | 264   | 1848                                      | -8                            | -7                    |
| 33 | 33            | 13.08.2018              | 64                                       | 70                                           | 264   | 264   | 264   | 264   | 264   | 264   | 264   | 1848                                      | 6                             | -1                    |
| 34 | 34            | 20.08.2018              | 73                                       | 80                                           | 316,8 | 316,8 | 316,8 | 316,8 | 316,8 | 264   | 264   | 2112                                      | 7                             | 6                     |
| 35 | 35            | 27.08.2018              | 84                                       | 84                                           | 316,8 | 316,8 | 316,8 | 316,8 | 316,8 | 316,8 | 316,8 | 2217,6                                    | 0                             | 6                     |
| 36 | 36            | 03.09.2018              | 47                                       | 50                                           | 264   | 264   | 264   | 264   | 264   | 0     | 0     | 1320                                      | 3                             | 9                     |
| 37 | 37            | 10.09.2018              | 43                                       | 50                                           | 264   | 264   | 264   | 264   | 264   | 0     | 0     | 1320                                      | 7                             | 16                    |
| 38 | 38            | 17.09.2018              | 34                                       | 27                                           | 158,4 | 158,4 | 132   | 132   | 132   | 0     | 0     | 712,8                                     | -7                            | 9                     |
| 39 | 39            | 24.09.2018              | 36                                       | 27                                           | 158,4 | 158,4 | 132   | 132   | 132   | 0     | 0     | 712,8                                     | -9                            | 0                     |
| 40 | 40            | 01.10.2018              | 40                                       | 50                                           | 264   | 264   | 264   | 264   | 264   | 0     | 0     | 1320                                      | 10                            | 10                    |
| 41 | 41            | 08.10.2018              | 38                                       | 50                                           | 264   | 264   | 264   | 264   | 264   | 0     | 0     | 1320                                      | 12                            | 22                    |
| 42 | 42            | 15.10.2018              | 40                                       | 30                                           | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 0     | 0     | 792                                       | -10                           | 12                    |
| 43 | 43            | 22.10.2018              | 34                                       | 30                                           | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 0     | 0     | 792                                       | -4                            | 8                     |
| 44 | 44            | 29.10.2018              | 39                                       | 30                                           | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 0     | 0     | 792                                       | -9                            | -1                    |
| 45 | 45            | 05.11.2018              | 52                                       | 80                                           | 316,8 | 316,8 | 316,8 | 316,8 | 316,8 | 264   | 264   | 2112                                      | 28                            | 27                    |
| 46 | 46            | 12.11.2018              | 79                                       | 80                                           | 316,8 | 316,8 | 316,8 | 316,8 | 316,8 | 264   | 264   | 2112                                      | 1                             | 28                    |
| 47 | 47            | 19.11.2018              | 82                                       | 80                                           | 316,8 | 316,8 | 316,8 | 316,8 | 316,8 | 264   | 264   | 2112                                      | -2                            | 26                    |
| 48 | 48            | 26.11.2018              | 82                                       | 80                                           | 316,8 | 316,8 | 316,8 | 316,8 | 316,8 | 264   | 264   | 2112                                      | -2                            | 24                    |
| 49 | 49            | 03.12.2018              | 81                                       | 80                                           | 316,8 | 316,8 | 316,8 | 316,8 | 316,8 | 264   | 264   | 2112                                      | -1                            | 23                    |
| 50 | 50            | 10.12.2018              | 85                                       | 60                                           | 316,8 | 316,8 | 316,8 | 316,8 | 316,8 | 0     | 0     | 1584                                      | -25                           | -2                    |
| 51 | 51            | 17.12.2018              | 64                                       | 60                                           | 316,8 | 316,8 | 316,8 | 316,8 | 316,8 | 0     | 0     | 1584                                      | -4                            | -6                    |
| 52 | 52            | 24.12.2018              | 17                                       | 25                                           | 132   | 132   | 132   | 132   | 132   | 0     | 0     | 660                                       | 8                             | 2                     |
| 53 | 53            | 30.12.2018              | 0                                        | 0                                            | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0                                         | 0                             | 2                     |

Abbildung 43: Produktionsplan P1

|    | A             | B                       | C                                        | D                                            | E     | F     | G     | H     | I     | J     | K     | L                                         | M                          | N                     |
|----|---------------|-------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------------------------------------|----------------------------|-----------------------|
|    | Woche<br>(KW) | Start<br>Datum<br>Woche | Auftragseingang<br>für Woche in<br>[Stk] | Produktionsmenge<br>für Woche in<br>[Stk/Wo] | Mo    | Di    | Mi    | Do    | Fr    | Sa    | So    | Wöchentlicher<br>Stromverbrauch<br>in kWh | Bestand<br>für Wo<br>[Stk] | Kum. Bestand<br>[Stk] |
| 2  | 1             | 01.01.2018              | 18                                       | 33                                           | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 0     | 871,2                                     | 15                         | 15                    |
| 3  | 2             | 08.01.2018              | 25                                       | 33                                           | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 0     | 871,2                                     | 8                          | 23                    |
| 4  | 3             | 15.01.2018              | 27                                       | 33                                           | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 0     | 871,2                                     | 6                          | 29                    |
| 5  | 4             | 22.01.2018              | 30                                       | 33                                           | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 0     | 871,2                                     | 3                          | 32                    |
| 6  | 5             | 29.01.2018              | 25                                       | 33                                           | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 0     | 871,2                                     | 8                          | 40                    |
| 7  | 6             | 05.02.2018              | 34                                       | 33                                           | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 0     | 871,2                                     | -1                         | 39                    |
| 8  | 7             | 12.02.2018              | 38                                       | 33                                           | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 0     | 871,2                                     | -5                         | 34                    |
| 9  | 8             | 19.02.2018              | 36                                       | 33                                           | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 0     | 871,2                                     | -3                         | 31                    |
| 10 | 9             | 26.02.2018              | 32                                       | 49                                           | 277,2 | 145,2 | 277,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 1280,4                                    | 17                         | 48                    |
| 11 | 10            | 05.03.2018              | 45                                       | 49                                           | 277,2 | 145,2 | 277,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 1280,4                                    | 4                          | 51                    |
| 12 | 11            | 12.03.2018              | 53                                       | 49                                           | 277,2 | 145,2 | 277,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 1280,4                                    | -4                         | 47                    |
| 13 | 12            | 19.03.2018              | 46                                       | 49                                           | 277,2 | 145,2 | 277,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 1280,4                                    | 3                          | 49                    |
| 14 | 13            | 26.03.2018              | 40                                       | 49                                           | 277,2 | 145,2 | 277,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 1280,4                                    | 9                          | 58                    |
| 15 | 14            | 02.04.2018              | 43                                       | 49                                           | 277,2 | 145,2 | 277,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 1280,4                                    | 6                          | 63                    |
| 16 | 15            | 09.04.2018              | 50                                       | 49                                           | 277,2 | 145,2 | 277,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 1280,4                                    | -1                         | 62                    |
| 17 | 16            | 16.04.2018              | 46                                       | 49                                           | 277,2 | 145,2 | 277,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 1280,4                                    | 3                          | 64                    |
| 18 | 17            | 23.04.2018              | 41                                       | 49                                           | 277,2 | 145,2 | 277,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 1280,4                                    | 8                          | 72                    |
| 19 | 18            | 30.04.2018              | 45                                       | 49                                           | 277,2 | 145,2 | 277,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 1280,4                                    | 4                          | 75                    |
| 20 | 19            | 07.05.2018              | 54                                       | 49                                           | 277,2 | 145,2 | 277,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 1280,4                                    | -5                         | 70                    |
| 21 | 20            | 14.05.2018              | 47                                       | 49                                           | 277,2 | 145,2 | 277,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 1280,4                                    | 2                          | 71                    |
| 22 | 21            | 21.05.2018              | 50                                       | 49                                           | 277,2 | 145,2 | 277,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 1280,4                                    | -1                         | 70                    |
| 23 | 22            | 28.05.2018              | 49                                       | 49                                           | 277,2 | 145,2 | 277,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 1280,4                                    | 0                          | 69                    |
| 24 | 23            | 04.06.2018              | 48                                       | 49                                           | 277,2 | 145,2 | 277,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 1280,4                                    | 1                          | 70                    |
| 25 | 24            | 11.06.2018              | 51                                       | 49                                           | 277,2 | 145,2 | 277,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 1280,4                                    | -2                         | 67                    |
| 26 | 25            | 18.06.2018              | 52                                       | 49                                           | 277,2 | 145,2 | 277,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 1280,4                                    | -3                         | 64                    |
| 27 | 26            | 25.06.2018              | 49                                       | 49                                           | 277,2 | 145,2 | 277,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 1280,4                                    | 0                          | 63                    |
| 28 | 27            | 02.07.2018              | 72                                       | 74                                           | 277,2 | 277,2 | 277,2 | 277,2 | 277,2 | 277,2 | 277,2 | 1940,4                                    | 2                          | 65                    |
| 29 | 28            | 09.07.2018              | 71                                       | 74                                           | 277,2 | 277,2 | 277,2 | 277,2 | 277,2 | 277,2 | 277,2 | 1940,4                                    | 3                          | 67                    |
| 30 | 29            | 16.07.2018              | 78                                       | 74                                           | 277,2 | 277,2 | 277,2 | 277,2 | 277,2 | 277,2 | 277,2 | 1940,4                                    | -4                         | 63                    |
| 31 | 30            | 23.07.2018              | 66                                       | 74                                           | 277,2 | 277,2 | 277,2 | 277,2 | 277,2 | 277,2 | 277,2 | 1940,4                                    | 8                          | 70                    |
| 32 | 31            | 30.07.2018              | 63                                       | 74                                           | 277,2 | 277,2 | 277,2 | 277,2 | 277,2 | 277,2 | 277,2 | 1940,4                                    | 11                         | 81                    |
| 33 | 32            | 06.08.2018              | 78                                       | 74                                           | 277,2 | 277,2 | 277,2 | 277,2 | 277,2 | 277,2 | 277,2 | 1940,4                                    | -4                         | 76                    |
| 34 | 33            | 13.08.2018              | 64                                       | 74                                           | 277,2 | 277,2 | 277,2 | 277,2 | 277,2 | 277,2 | 277,2 | 1940,4                                    | 10                         | 86                    |
| 35 | 34            | 20.08.2018              | 73                                       | 74                                           | 277,2 | 277,2 | 277,2 | 277,2 | 277,2 | 277,2 | 277,2 | 1940,4                                    | 1                          | 86                    |
| 36 | 35            | 27.08.2018              | 84                                       | 74                                           | 277,2 | 277,2 | 277,2 | 277,2 | 277,2 | 277,2 | 277,2 | 1940,4                                    | -11                        | 76                    |
| 37 | 36            | 03.09.2018              | 47                                       | 39                                           | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 1016,4                                    | -8                         | 67                    |
| 38 | 37            | 10.09.2018              | 43                                       | 39                                           | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 1016,4                                    | -4                         | 63                    |
| 39 | 38            | 17.09.2018              | 34                                       | 39                                           | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 1016,4                                    | 5                          | 67                    |
| 40 | 39            | 24.09.2018              | 36                                       | 39                                           | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 1016,4                                    | 3                          | 70                    |
| 41 | 40            | 01.10.2018              | 40                                       | 39                                           | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 1016,4                                    | -1                         | 68                    |
| 42 | 41            | 08.10.2018              | 38                                       | 39                                           | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 1016,4                                    | 1                          | 69                    |
| 43 | 42            | 15.10.2018              | 40                                       | 39                                           | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 1016,4                                    | -1                         | 67                    |
| 44 | 43            | 22.10.2018              | 34                                       | 39                                           | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 1016,4                                    | 5                          | 72                    |
| 45 | 44            | 29.10.2018              | 39                                       | 39                                           | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 1016,4                                    | 0                          | 71                    |
| 46 | 45            | 05.11.2018              | 52                                       | 69                                           | 277,2 | 277,2 | 277,2 | 277,2 | 277,2 | 277,2 | 145,2 | 1808,4                                    | 17                         | 88                    |
| 47 | 46            | 12.11.2018              | 79                                       | 69                                           | 277,2 | 277,2 | 277,2 | 277,2 | 277,2 | 277,2 | 145,2 | 1808,4                                    | -11                        | 77                    |
| 48 | 47            | 19.11.2018              | 82                                       | 69                                           | 277,2 | 277,2 | 277,2 | 277,2 | 277,2 | 277,2 | 145,2 | 1808,4                                    | -14                        | 64                    |
| 49 | 48            | 26.11.2018              | 82                                       | 69                                           | 277,2 | 277,2 | 277,2 | 277,2 | 277,2 | 277,2 | 145,2 | 1808,4                                    | -14                        | 50                    |
| 50 | 49            | 03.12.2018              | 81                                       | 69                                           | 277,2 | 277,2 | 277,2 | 277,2 | 277,2 | 277,2 | 145,2 | 1808,4                                    | -13                        | 38                    |
| 51 | 50            | 10.12.2018              | 85                                       | 44                                           | 277,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 1148,4                                    | -42                        | -4                    |
| 52 | 51            | 17.12.2018              | 64                                       | 44                                           | 277,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 1148,4                                    | -21                        | -24                   |
| 53 | 52            | 24.12.2018              | 17                                       | 44                                           | 277,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 1148,4                                    | 27                         | 2                     |
| 54 | 53            | 30.12.2018              | 0                                        | 0                                            | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0                                         | 0                          | 2                     |

Abbildung 44: Produktionsplan P2

|    | A             | B                       | C                                        | D                                            | E     | F     | G     | H     | I     | J  | K  | L                                         | M                          | N                     |
|----|---------------|-------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|----|----|-------------------------------------------|----------------------------|-----------------------|
|    | Woche<br>(KW) | Start<br>Datum<br>Woche | Auftragseingang<br>für Woche in<br>[Stk] | Produktionsmenge<br>für Woche in<br>[Stk/Wo] | Mo    | Di    | Mi    | Do    | Fr    | Sa | So | Wöchentlicher<br>Stromverbrauch<br>in kWh | Bestand<br>für Wo<br>[Stk] | Kum. Bestand<br>[Stk] |
| 2  | 1             | 01.01.2018              | 18                                       | 51                                           | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 191,4 | 0  | 0  | 1353                                      | 33                         | 33                    |
| 3  | 2             | 08.01.2018              | 25                                       | 51                                           | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 191,4 | 0  | 0  | 1353                                      | 26                         | 59                    |
| 4  | 3             | 15.01.2018              | 27                                       | 51                                           | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 191,4 | 0  | 0  | 1353                                      | 24                         | 84                    |
| 5  | 4             | 22.01.2018              | 30                                       | 51                                           | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 191,4 | 0  | 0  | 1353                                      | 21                         | 105                   |
| 6  | 5             | 29.01.2018              | 25                                       | 51                                           | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 191,4 | 0  | 0  | 1353                                      | 26                         | 131                   |
| 7  | 6             | 05.02.2018              | 34                                       | 51                                           | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 191,4 | 0  | 0  | 1353                                      | 17                         | 148                   |
| 8  | 7             | 12.02.2018              | 38                                       | 51                                           | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 191,4 | 0  | 0  | 1353                                      | 13                         | 162                   |
| 9  | 8             | 19.02.2018              | 36                                       | 51                                           | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 191,4 | 0  | 0  | 1353                                      | 15                         | 177                   |
| 10 | 9             | 26.02.2018              | 32                                       | 51                                           | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 191,4 | 0  | 0  | 1353                                      | 19                         | 196                   |
| 11 | 10            | 05.03.2018              | 45                                       | 51                                           | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 191,4 | 0  | 0  | 1353                                      | 6                          | 202                   |
| 12 | 11            | 12.03.2018              | 53                                       | 51                                           | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 191,4 | 0  | 0  | 1353                                      | -2                         | 201                   |
| 13 | 12            | 19.03.2018              | 46                                       | 51                                           | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 191,4 | 0  | 0  | 1353                                      | 5                          | 206                   |
| 14 | 13            | 26.03.2018              | 40                                       | 51                                           | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 191,4 | 0  | 0  | 1353                                      | 11                         | 217                   |
| 15 | 14            | 02.04.2018              | 43                                       | 51                                           | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 191,4 | 0  | 0  | 1353                                      | 8                          | 225                   |
| 16 | 15            | 09.04.2018              | 50                                       | 51                                           | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 191,4 | 0  | 0  | 1353                                      | 1                          | 227                   |
| 17 | 16            | 16.04.2018              | 46                                       | 51                                           | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 191,4 | 0  | 0  | 1353                                      | 5                          | 232                   |
| 18 | 17            | 23.04.2018              | 41                                       | 51                                           | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 191,4 | 0  | 0  | 1353                                      | 10                         | 242                   |
| 19 | 18            | 30.04.2018              | 45                                       | 51                                           | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 191,4 | 0  | 0  | 1353                                      | 6                          | 248                   |
| 20 | 19            | 07.05.2018              | 54                                       | 51                                           | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 191,4 | 0  | 0  | 1353                                      | -3                         | 246                   |
| 21 | 20            | 14.05.2018              | 47                                       | 51                                           | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 191,4 | 0  | 0  | 1353                                      | 4                          | 250                   |
| 22 | 21            | 21.05.2018              | 50                                       | 51                                           | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 191,4 | 0  | 0  | 1353                                      | 1                          | 251                   |
| 23 | 22            | 28.05.2018              | 49                                       | 51                                           | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 191,4 | 0  | 0  | 1353                                      | 2                          | 253                   |
| 24 | 23            | 04.06.2018              | 48                                       | 51                                           | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 191,4 | 0  | 0  | 1353                                      | 3                          | 257                   |
| 25 | 24            | 11.06.2018              | 51                                       | 51                                           | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 191,4 | 0  | 0  | 1353                                      | 0                          | 257                   |
| 26 | 25            | 18.06.2018              | 52                                       | 51                                           | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 191,4 | 0  | 0  | 1353                                      | -1                         | 256                   |
| 27 | 26            | 25.06.2018              | 49                                       | 51                                           | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 191,4 | 0  | 0  | 1353                                      | 2                          | 258                   |
| 28 | 27            | 02.07.2018              | 72                                       | 51                                           | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 191,4 | 0  | 0  | 1353                                      | -21                        | 238                   |
| 29 | 28            | 09.07.2018              | 71                                       | 51                                           | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 191,4 | 0  | 0  | 1353                                      | -20                        | 218                   |
| 30 | 29            | 16.07.2018              | 78                                       | 51                                           | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 191,4 | 0  | 0  | 1353                                      | -27                        | 191                   |
| 31 | 30            | 23.07.2018              | 66                                       | 51                                           | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 191,4 | 0  | 0  | 1353                                      | -15                        | 176                   |
| 32 | 31            | 30.07.2018              | 63                                       | 51                                           | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 191,4 | 0  | 0  | 1353                                      | -12                        | 165                   |
| 33 | 32            | 06.08.2018              | 78                                       | 51                                           | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 191,4 | 0  | 0  | 1353                                      | -27                        | 138                   |
| 34 | 33            | 13.08.2018              | 64                                       | 51                                           | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 191,4 | 0  | 0  | 1353                                      | -13                        | 125                   |
| 35 | 34            | 20.08.2018              | 73                                       | 51                                           | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 191,4 | 0  | 0  | 1353                                      | -22                        | 103                   |
| 36 | 35            | 27.08.2018              | 84                                       | 51                                           | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 191,4 | 0  | 0  | 1353                                      | -33                        | 71                    |
| 37 | 36            | 03.09.2018              | 47                                       | 51                                           | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 191,4 | 0  | 0  | 1353                                      | 4                          | 75                    |
| 38 | 37            | 10.09.2018              | 43                                       | 51                                           | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 191,4 | 0  | 0  | 1353                                      | 8                          | 83                    |
| 39 | 38            | 17.09.2018              | 34                                       | 51                                           | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 191,4 | 0  | 0  | 1353                                      | 17                         | 100                   |
| 40 | 39            | 24.09.2018              | 36                                       | 51                                           | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 191,4 | 0  | 0  | 1353                                      | 15                         | 116                   |
| 41 | 40            | 01.10.2018              | 40                                       | 51                                           | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 191,4 | 0  | 0  | 1353                                      | 11                         | 127                   |
| 42 | 41            | 08.10.2018              | 38                                       | 51                                           | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 191,4 | 0  | 0  | 1353                                      | 13                         | 140                   |
| 43 | 42            | 15.10.2018              | 40                                       | 51                                           | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 191,4 | 0  | 0  | 1353                                      | 11                         | 151                   |
| 44 | 43            | 22.10.2018              | 34                                       | 51                                           | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 191,4 | 0  | 0  | 1353                                      | 17                         | 169                   |
| 45 | 44            | 29.10.2018              | 39                                       | 51                                           | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 191,4 | 0  | 0  | 1353                                      | 12                         | 181                   |
| 46 | 45            | 05.11.2018              | 52                                       | 51                                           | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 191,4 | 0  | 0  | 1353                                      | -1                         | 180                   |
| 47 | 46            | 12.11.2018              | 79                                       | 51                                           | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 191,4 | 0  | 0  | 1353                                      | -28                        | 152                   |
| 48 | 47            | 19.11.2018              | 82                                       | 51                                           | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 191,4 | 0  | 0  | 1353                                      | -31                        | 122                   |
| 49 | 48            | 26.11.2018              | 82                                       | 51                                           | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 191,4 | 0  | 0  | 1353                                      | -31                        | 91                    |
| 50 | 49            | 03.12.2018              | 81                                       | 51                                           | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 191,4 | 0  | 0  | 1353                                      | -30                        | 61                    |
| 51 | 50            | 10.12.2018              | 85                                       | 51                                           | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 191,4 | 0  | 0  | 1353                                      | -34                        | 27                    |
| 52 | 51            | 17.12.2018              | 64                                       | 51                                           | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 191,4 | 0  | 0  | 1353                                      | -13                        | 15                    |
| 53 | 52            | 24.12.2018              | 17                                       | 3                                            | 82,5  | 0     | 0     | 0     | 0     | 0  | 0  | 82,5                                      | -14                        | 1                     |
| 54 | 53            | 30.12.2018              | 0                                        | 0                                            | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0  | 0  | 0                                         | 0                          | 1                     |

Abbildung 45: Produktionsplan P3

|    | A             | B                       | C                                        | D                                            | E     | F     | G     | H     | I     | J     | K     | L                                         | M                          | N                     |
|----|---------------|-------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------------------------------------|----------------------------|-----------------------|
|    | Woche<br>(KW) | Start<br>Datum<br>Woche | Auftragseingang<br>für Woche in<br>[Stk] | Produktionsmenge<br>für Woche in<br>[Stk/Wo] | Mo    | Di    | Mi    | Do    | Fr    | Sa    | So    | Wöchentlicher<br>Stromverbrauch<br>in kWh | Bestand<br>für Wo<br>[Stk] | Kum. Bestand<br>[Stk] |
| 2  | 1             | 01.01.2018              | 18                                       | 20                                           | 132   | 132   | 132   | 132   | 0     | 0     | 0     | 528                                       | 2                          | 2                     |
| 3  | 2             | 08.01.2018              | 25                                       | 25                                           | 132   | 132   | 132   | 132   | 132   | 0     | 0     | 660                                       | 0                          | 2                     |
| 4  | 3             | 15.01.2018              | 27                                       | 26                                           | 145,2 | 145,2 | 132   | 132   | 132   | 0     | 0     | 686,4                                     | -1                         | 1                     |
| 5  | 4             | 22.01.2018              | 30                                       | 30                                           | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 0     | 0     | 792                                       | 0                          | 1                     |
| 6  | 5             | 29.01.2018              | 25                                       | 25                                           | 132   | 132   | 132   | 132   | 132   | 0     | 0     | 660                                       | 0                          | 1                     |
| 7  | 6             | 05.02.2018              | 34                                       | 35                                           | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 132   | 0     | 924                                       | 1                          | 2                     |
| 8  | 7             | 12.02.2018              | 38                                       | 38                                           | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 132   | 132   | 132   | 132   | 1003,2                                    | 0                          | 2                     |
| 9  | 8             | 19.02.2018              | 36                                       | 36                                           | 158,4 | 132   | 132   | 132   | 132   | 132   | 132   | 950,4                                     | 0                          | 2                     |
| 10 | 9             | 26.02.2018              | 32                                       | 30                                           | 132   | 132   | 132   | 132   | 132   | 132   | 0     | 792                                       | -2                         | 0                     |
| 11 | 10            | 05.03.2018              | 45                                       | 50                                           | 264   | 264   | 264   | 264   | 264   | 0     | 0     | 1320                                      | 5                          | 5                     |
| 12 | 11            | 12.03.2018              | 53                                       | 50                                           | 264   | 264   | 264   | 264   | 264   | 0     | 0     | 1320                                      | -3                         | 2                     |
| 13 | 12            | 19.03.2018              | 46                                       | 50                                           | 264   | 264   | 264   | 264   | 264   | 0     | 0     | 1320                                      | 4                          | 6                     |
| 14 | 13            | 26.03.2018              | 40                                       | 40                                           | 264   | 264   | 264   | 264   | 264   | 0     | 0     | 1056                                      | 0                          | 6                     |
| 15 | 14            | 02.04.2018              | 43                                       | 39                                           | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 1016,4                                    | -4                         | 2                     |
| 16 | 15            | 09.04.2018              | 50                                       | 50                                           | 264   | 264   | 264   | 264   | 264   | 0     | 0     | 1320                                      | 0                          | 2                     |
| 17 | 16            | 16.04.2018              | 46                                       | 50                                           | 264   | 264   | 264   | 264   | 264   | 0     | 0     | 1320                                      | 4                          | 6                     |
| 18 | 17            | 23.04.2018              | 41                                       | 40                                           | 264   | 264   | 264   | 264   | 264   | 0     | 0     | 1056                                      | -1                         | 5                     |
| 19 | 18            | 30.04.2018              | 45                                       | 42                                           | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 1108,8                                    | -3                         | 2                     |
| 20 | 19            | 07.05.2018              | 54                                       | 55                                           | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 0     | 0     | 1452                                      | 1                          | 3                     |
| 21 | 20            | 14.05.2018              | 47                                       | 50                                           | 264   | 264   | 264   | 264   | 264   | 0     | 0     | 1320                                      | 3                          | 6                     |
| 22 | 21            | 21.05.2018              | 50                                       | 50                                           | 264   | 264   | 264   | 264   | 264   | 0     | 0     | 1320                                      | 0                          | 6                     |
| 23 | 22            | 28.05.2018              | 49                                       | 50                                           | 264   | 264   | 264   | 264   | 264   | 0     | 0     | 1320                                      | 1                          | 7                     |
| 24 | 23            | 04.06.2018              | 48                                       | 42                                           | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 1108,8                                    | -6                         | 1                     |
| 25 | 24            | 11.06.2018              | 51                                       | 50                                           | 264   | 264   | 264   | 264   | 264   | 0     | 0     | 1320                                      | -1                         | 0                     |
| 26 | 25            | 18.06.2018              | 52                                       | 55                                           | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 0     | 0     | 1452                                      | 3                          | 3                     |
| 27 | 26            | 25.06.2018              | 49                                       | 50                                           | 264   | 264   | 264   | 264   | 264   | 0     | 0     | 1320                                      | 1                          | 4                     |
| 28 | 27            | 02.07.2018              | 72                                       | 70                                           | 264   | 264   | 264   | 264   | 264   | 264   | 264   | 1848                                      | -2                         | 2                     |
| 29 | 28            | 09.07.2018              | 71                                       | 73                                           | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 264   | 264   | 264   | 264   | 1927,2                                    | 2                          | 4                     |
| 30 | 29            | 16.07.2018              | 78                                       | 74                                           | 316,8 | 316,8 | 264   | 264   | 264   | 264   | 264   | 1953,6                                    | -4                         | 0                     |
| 31 | 30            | 23.07.2018              | 66                                       | 69                                           | 316,8 | 316,8 | 316,8 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 0     | 1821,6                                    | 3                          | 3                     |
| 32 | 31            | 30.07.2018              | 63                                       | 66                                           | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 0     | 1742,4                                    | 3                          | 6                     |
| 33 | 32            | 06.08.2018              | 78                                       | 77                                           | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 2032,8                                    | -1                         | 5                     |
| 34 | 33            | 13.08.2018              | 64                                       | 60                                           | 316,8 | 316,8 | 316,8 | 316,8 | 316,8 | 0     | 0     | 1584                                      | -4                         | 1                     |
| 35 | 34            | 20.08.2018              | 73                                       | 72                                           | 316,8 | 316,8 | 316,8 | 316,8 | 316,8 | 316,8 | 0     | 1900,8                                    | -1                         | 0                     |
| 36 | 35            | 27.08.2018              | 84                                       | 84                                           | 316,8 | 316,8 | 316,8 | 316,8 | 316,8 | 316,8 | 316,8 | 2217,6                                    | 0                          | 0                     |
| 37 | 36            | 03.09.2018              | 47                                       | 50                                           | 264   | 264   | 264   | 264   | 264   | 0     | 0     | 1320                                      | 3                          | 3                     |
| 38 | 37            | 10.09.2018              | 43                                       | 40                                           | 264   | 264   | 264   | 264   | 0     | 0     | 0     | 1056                                      | -3                         | 0                     |
| 39 | 38            | 17.09.2018              | 34                                       | 35                                           | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 132   | 0     | 924                                       | 1                          | 1                     |
| 40 | 39            | 24.09.2018              | 36                                       | 35                                           | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 132   | 0     | 924                                       | -1                         | 0                     |
| 41 | 40            | 01.10.2018              | 40                                       | 40                                           | 264   | 264   | 264   | 264   | 0     | 0     | 0     | 1056                                      | 0                          | 0                     |
| 42 | 41            | 08.10.2018              | 38                                       | 40                                           | 264   | 264   | 264   | 264   | 0     | 0     | 0     | 1056                                      | 2                          | 2                     |
| 43 | 42            | 15.10.2018              | 40                                       | 40                                           | 264   | 264   | 264   | 264   | 0     | 0     | 0     | 1056                                      | 0                          | 2                     |
| 44 | 43            | 22.10.2018              | 34                                       | 35                                           | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 132   | 0     | 924                                       | 1                          | 3                     |
| 45 | 44            | 29.10.2018              | 39                                       | 40                                           | 264   | 264   | 264   | 264   | 0     | 0     | 0     | 1056                                      | 1                          | 4                     |
| 46 | 45            | 05.11.2018              | 52                                       | 50                                           | 264   | 264   | 264   | 264   | 264   | 0     | 0     | 1320                                      | -2                         | 2                     |
| 47 | 46            | 12.11.2018              | 79                                       | 77                                           | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 2032,8                                    | -2                         | 0                     |
| 48 | 47            | 19.11.2018              | 82                                       | 84                                           | 316,8 | 316,8 | 316,8 | 316,8 | 316,8 | 316,8 | 316,8 | 2217,6                                    | 2                          | 2                     |
| 49 | 48            | 26.11.2018              | 82                                       | 84                                           | 316,8 | 316,8 | 316,8 | 316,8 | 316,8 | 316,8 | 316,8 | 2217,6                                    | 2                          | 4                     |
| 50 | 49            | 03.12.2018              | 81                                       | 83                                           | 316,8 | 316,8 | 316,8 | 316,8 | 316,8 | 316,8 | 290,4 | 2191,2                                    | 2                          | 6                     |
| 51 | 50            | 10.12.2018              | 85                                       | 84                                           | 316,8 | 316,8 | 316,8 | 316,8 | 316,8 | 316,8 | 316,8 | 2217,6                                    | -1                         | 5                     |
| 52 | 51            | 17.12.2018              | 64                                       | 60                                           | 264   | 264   | 264   | 264   | 264   | 264   | 0     | 1584                                      | -4                         | 1                     |
| 53 | 52            | 24.12.2018              | 17                                       | 17                                           | 145,2 | 145,2 | 145,2 | 0     | 0     | 0     | 0     | 435,6                                     | -1                         | 0                     |
| 54 | 53            | 30.12.2018              | 0                                        | 0                                            | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0                                         | 0                          | 0                     |

Abbildung 46: Produktionsplan P4

|    | A             | B                       | C                                        | D                                            | E     | F     | G     | H     | I     | J     | K     | L                                         | M                       | N                     |
|----|---------------|-------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------------------------------------|-------------------------|-----------------------|
|    | Woche<br>(KW) | Start<br>Datum<br>Woche | Auftragseingang<br>für Woche in<br>[Stk] | Produktionsmenge<br>für Woche in<br>[Stk/Wo] | Mo    | Di    | Mi    | Do    | Fr    | Sa    | So    | Wöchentlicher<br>Stromverbrauch<br>in kWh | Bestand für<br>Wo [Stk] | Kum. Bestand<br>[Stk] |
| 1  |               |                         |                                          |                                              |       |       |       |       |       |       |       |                                           |                         |                       |
| 2  | 1             | 01.01.2018              | 18                                       | 20                                           | 0     | 0     | 132   | 132   | 0     | 132   | 132   | 528                                       | 2                       | 2                     |
| 3  | 2             | 08.01.2018              | 25                                       | 20                                           | 132   | 0     | 0     | 0     | 132   | 132   | 132   | 528                                       | -5                      | -3                    |
| 4  | 3             | 15.01.2018              | 27                                       | 25                                           | 0     | 132   | 132   | 132   | 0     | 132   | 132   | 660                                       | -2                      | -5                    |
| 5  | 4             | 22.01.2018              | 30                                       | 42                                           | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 1108,8                                    | 12                      | 7                     |
| 6  | 5             | 29.01.2018              | 25                                       | 24                                           | 0     | 158,4 | 0     | 158,4 | 158,4 | 0     | 158,4 | 633,6                                     | -1                      | 6                     |
| 7  | 6             | 05.02.2018              | 34                                       | 30                                           | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 0     | 0     | 792                                       | -4                      | 2                     |
| 8  | 7             | 12.02.2018              | 38                                       | 36                                           | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 0     | 158,4 | 158,4 | 950,4                                     | -2                      | 0                     |
| 9  | 8             | 19.02.2018              | 36                                       | 30                                           | 0     | 0     | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 792                                       | -6                      | -6                    |
| 10 | 9             | 26.02.2018              | 32                                       | 60                                           | 264   | 264   | 264   | 264   | 0     | 264   | 264   | 1584                                      | 28                      | 22                    |
| 11 | 10            | 05.03.2018              | 45                                       | 60                                           | 264   | 264   | 264   | 264   | 0     | 264   | 264   | 1584                                      | 15                      | 37                    |
| 12 | 11            | 12.03.2018              | 53                                       | 55                                           | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 0     | 0     | 290,4 | 290,4 | 1452                                      | 2                       | 39                    |
| 13 | 12            | 19.03.2018              | 46                                       | 69                                           | 316,8 | 290,4 | 316,8 | 290,4 | 316,8 | 290,4 | 0     | 1821,6                                    | 23                      | 62                    |
| 14 | 13            | 26.03.2018              | 40                                       | 46                                           | 0     | 0     | 316,8 | 290,4 | 316,8 | 290,4 | 0     | 1214,4                                    | 6                       | 68                    |
| 15 | 14            | 02.04.2018              | 43                                       | 80                                           | 290,4 | 316,8 | 290,4 | 316,8 | 290,4 | 316,8 | 290,4 | 2112                                      | 37                      | 105                   |
| 16 | 15            | 09.04.2018              | 50                                       | 80                                           | 290,4 | 316,8 | 290,4 | 316,8 | 290,4 | 316,8 | 290,4 | 2112                                      | 30                      | 135                   |
| 17 | 16            | 16.04.2018              | 46                                       | 69                                           | 290,4 | 0     | 316,8 | 290,4 | 316,8 | 290,4 | 316,8 | 1821,6                                    | 23                      | 158                   |
| 18 | 17            | 23.04.2018              | 41                                       | 55                                           | 0     | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 0     | 1452                                      | 14                      | 172                   |
| 19 | 18            | 30.04.2018              | 45                                       | 55                                           | 290,4 | 290,4 | 0     | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 0     | 1452                                      | 10                      | 182                   |
| 20 | 19            | 07.05.2018              | 54                                       | 77                                           | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 2032,8                                    | 23                      | 205                   |
| 21 | 20            | 14.05.2018              | 47                                       | 55                                           | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 0     | 0     | 290,4 | 1452                                      | 8                       | 213                   |
| 22 | 21            | 21.05.2018              | 50                                       | 30                                           | 0     | 0     | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 792                                       | -20                     | 193                   |
| 23 | 22            | 28.05.2018              | 49                                       | 77                                           | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 2032,8                                    | 28                      | 221                   |
| 24 | 23            | 04.06.2018              | 48                                       | 30                                           | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 0     | 0     | 792                                       | -18                     | 203                   |
| 25 | 24            | 11.06.2018              | 51                                       | 55                                           | 290,4 | 290,4 | 0     | 290,4 | 0     | 290,4 | 290,4 | 1452                                      | 4                       | 207                   |
| 26 | 25            | 18.06.2018              | 52                                       | 66                                           | 0     | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 1742,4                                    | 14                      | 221                   |
| 27 | 26            | 25.06.2018              | 49                                       | 36                                           | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 0     | 950,4                                     | -13                     | 208                   |
| 28 | 27            | 02.07.2018              | 72                                       | 72                                           | 316,8 | 316,8 | 316,8 | 316,8 | 316,8 | 316,8 | 0     | 1900,8                                    | 0                       | 208                   |
| 29 | 28            | 09.07.2018              | 71                                       | 66                                           | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 0     | 1742,4                                    | -5                      | 203                   |
| 30 | 29            | 16.07.2018              | 78                                       | 58                                           | 290,4 | 316,8 | 0     | 290,4 | 316,8 | 0     | 316,8 | 1531,2                                    | -20                     | 183                   |
| 31 | 30            | 23.07.2018              | 66                                       | 69                                           | 316,8 | 290,4 | 0     | 290,4 | 290,4 | 316,8 | 316,8 | 1821,6                                    | 3                       | 186                   |
| 32 | 31            | 30.07.2018              | 63                                       | 83                                           | 316,8 | 316,8 | 316,8 | 316,8 | 290,4 | 316,8 | 316,8 | 2191,2                                    | 20                      | 206                   |
| 33 | 32            | 06.08.2018              | 78                                       | 70                                           | 290,4 | 0     | 316,8 | 316,8 | 316,8 | 290,4 | 316,8 | 1848                                      | -8                      | 198                   |
| 34 | 33            | 13.08.2018              | 64                                       | 66                                           | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 0     | 290,4 | 290,4 | 1742,4                                    | 2                       | 200                   |
| 35 | 34            | 20.08.2018              | 73                                       | 72                                           | 316,8 | 316,8 | 316,8 | 316,8 | 0     | 316,8 | 316,8 | 1900,8                                    | -1                      | 199                   |
| 36 | 35            | 27.08.2018              | 84                                       | 68                                           | 290,4 | 290,4 | 316,8 | 0     | 316,8 | 290,4 | 290,4 | 1795,2                                    | -16                     | 183                   |
| 37 | 36            | 03.09.2018              | 47                                       | 60                                           | 0     | 316,8 | 316,8 | 316,8 | 316,8 | 316,8 | 0     | 1584                                      | 13                      | 196                   |
| 38 | 37            | 10.09.2018              | 43                                       | 63                                           | 316,8 | 264   | 264   | 0     | 290,4 | 264   | 264   | 1663,2                                    | 20                      | 216                   |
| 39 | 38            | 17.09.2018              | 34                                       | 52                                           | 0     | 264   | 290,4 | 0     | 264   | 290,4 | 264   | 1372,8                                    | 18                      | 234                   |
| 40 | 39            | 24.09.2018              | 36                                       | 51                                           | 264   | 264   | 264   | 264   | 290,4 | 0     | 0     | 1346,4                                    | 15                      | 249                   |
| 41 | 40            | 01.10.2018              | 40                                       | 72                                           | 316,8 | 316,8 | 316,8 | 316,8 | 316,8 | 0     | 316,8 | 1900,8                                    | 32                      | 281                   |
| 42 | 41            | 08.10.2018              | 38                                       | 30                                           | 158,4 | 0     | 158,4 | 0     | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 792                                       | -8                      | 273                   |
| 43 | 42            | 15.10.2018              | 40                                       | 66                                           | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 290,4 | 0     | 290,4 | 290,4 | 1742,4                                    | 26                      | 299                   |
| 44 | 43            | 22.10.2018              | 34                                       | 12                                           | 0     | 0     | 158,4 | 0     | 158,4 | 0     | 0     | 316,8                                     | -22                     | 277                   |
| 45 | 44            | 29.10.2018              | 39                                       | 42                                           | 290,4 | 264   | 264   | 0     | 0     | 0     | 290,4 | 1108,8                                    | 3                       | 280                   |
| 46 | 45            | 05.11.2018              | 52                                       | 30                                           | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 0     | 0     | 158,4 | 158,4 | 792                                       | -22                     | 258                   |
| 47 | 46            | 12.11.2018              | 79                                       | 24                                           | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 0     | 0     | 158,4 | 0     | 633,6                                     | -55                     | 203                   |
| 48 | 47            | 19.11.2018              | 82                                       | 24                                           | 0     | 158,4 | 0     | 158,4 | 158,4 | 0     | 158,4 | 633,6                                     | -58                     | 145                   |
| 49 | 48            | 26.11.2018              | 82                                       | 36                                           | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 0     | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 950,4                                     | -46                     | 99                    |
| 50 | 49            | 03.12.2018              | 81                                       | 36                                           | 0     | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 950,4                                     | -45                     | 54                    |
| 51 | 50            | 10.12.2018              | 85                                       | 30                                           | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 0     | 158,4 | 158,4 | 0     | 792                                       | -55                     | -1                    |
| 52 | 51            | 17.12.2018              | 64                                       | 42                                           | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 158,4 | 1108,8                                    | -22                     | -23                   |
| 53 | 52            | 24.12.2018              | 17                                       | 40                                           | 264   | 0     | 264   | 0     | 0     | 264   | 264   | 1056                                      | 23                      | 0                     |
| 54 | 53            | 30.12.2018              | 0                                        | 0                                            | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0                                         | 0                       | 0                     |

Abbildung 47: Produktionsplan P5

| Produktionsplan (Verbrauch ~ 70 000 kWh/A) |    |                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                               |  |  |  |
|--------------------------------------------|----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--|--|
|                                            |    | P1                                                                                                                                                            | P2                                                                                                                                                            | P3                                                                                                                                                             | P4                                                                                                                                                            | P5                                                                                                                                                            |  |  |  |
| Unternehmensausführung                     | U1 | Autarkie: 87,1 %<br>Eigenverbrauch: 33 %<br>Gesparte Strombezugskosten: 8 141 €<br>Strom-Bezug: 1 252 € (8 943 kWh)<br>Strom-Verkauf: 9 868 € (123 348 kWh)   | Autarkie: 92,4 %<br>Eigenverbrauch: 35,1 %<br>Gesparte Strombezugskosten: 8 642 €<br>Strom-Bezug: 734 € (5 242 kWh)<br>Strom-Verkauf: 9 571 € (119 645 kWh)   | Autarkie: 85,1 %<br>Eigenverbrauch: 32,2 %<br>Gesparte Strombezugskosten: 7 939 €<br>Strom-Bezug: 1 439 € (10 278 kWh)<br>Strom-Verkauf: 9 988 € (124 845 kWh) | Autarkie: 86,9 %<br>Eigenverbrauch: 32,9 %<br>Gesparte Strombezugskosten: 8 098 €<br>Strom-Bezug: 1 270 € (9 075 kWh)<br>Strom-Verkauf: 9 891 € (123 648 kWh) | Autarkie: 96,3 %<br>Eigenverbrauch: 36,4 %<br>Gesparte Strombezugskosten: 8 977 €<br>Strom-Bezug: 361 € (2 580 kWh)<br>Strom-Verkauf: 9 380 € (117 255 kWh)   |  |  |  |
|                                            | U2 | Autarkie: 65,0 %<br>Eigenverbrauch: 54,8 %<br>Gesparte Strombezugskosten: 6 078 €<br>Strom-Bezug: 3 392 € (24 227 kWh)<br>Strom-Verkauf: 2 991 € (37 388 kWh) | Autarkie: 71,1 %<br>Eigenverbrauch: 60,3 %<br>Gesparte Strombezugskosten: 6 700 €<br>Strom-Bezug: 2 747 € (19 624 kWh)<br>Strom-Verkauf: 2 625 € (32 810 kWh) | Autarkie: 62,0 %<br>Eigenverbrauch: 52,2 %<br>Gesparte Strombezugskosten: 5 783 €<br>Strom-Bezug: 3 675 € (26 247 kWh)<br>Strom-Verkauf: 3 164 € (39 549 kWh)  | Autarkie: 65,0 %<br>Eigenverbrauch: 54,7 %<br>Gesparte Strombezugskosten: 6 059 €<br>Strom-Bezug: 3 386 € (24 182 kWh)<br>Strom-Verkauf: 2 999 € (37 492 kWh) | Autarkie: 76,5 %<br>Eigenverbrauch: 64,1 %<br>Gesparte Strombezugskosten: 7 130 €<br>Strom-Bezug: 2 276 € (16 258 kWh)<br>Strom-Verkauf: 2 371 € (29 643 kWh) |  |  |  |
|                                            | U3 | Autarkie: 54,8 %<br>Eigenverbrauch: 74,6 %<br>Gesparte Strombezugskosten: 5 125 €<br>Strom-Bezug: 4 380 € (31 282 kWh)<br>Strom-Verkauf: 1 037 € (12 965 kWh) | Autarkie: 63,5 %<br>Eigenverbrauch: 86,3 %<br>Gesparte Strombezugskosten: 5 935 €<br>Strom-Bezug: 3 542 € (25 300 kWh)<br>Strom-Verkauf: 558 € (6 972 kWh)    | Autarkie: 50,8 %<br>Eigenverbrauch: 69,1 %<br>Gesparte Strombezugskosten: 4 741 €<br>Strom-Bezug: 4 755 € (33 967 kWh)<br>Strom-Verkauf: 1 262 € (15 784 kWh)  | Autarkie: 55,0 %<br>Eigenverbrauch: 74,8 %<br>Gesparte Strombezugskosten: 5 132 €<br>Strom-Bezug: 4 347 € (31 051 kWh)<br>Strom-Verkauf: 1 030 € (12 875 kWh) | Autarkie: 63,2 %<br>Eigenverbrauch: 85,7 %<br>Gesparte Strombezugskosten: 5 891 €<br>Strom-Bezug: 3 562 € (25 442 kWh)<br>Strom-Verkauf: 586 € (7 326 kWh)    |  |  |  |
|                                            | U4 | Autarkie: 24,7 %<br>Eigenverbrauch: 83,0 %<br>Gesparte Strombezugskosten: 2 308 €<br>Strom-Bezug: 7 302 € (52 151 kWh)<br>Strom-Verkauf: 281 € (3 506 kWh)    | Autarkie: 29,5 %<br>Eigenverbrauch: 99,2 %<br>Gesparte Strombezugskosten: 2 760 €<br>Strom-Bezug: 6 834 € (48 814 kWh)<br>Strom-Verkauf: 13 € (165 kWh)       | Autarkie: 22,3 %<br>Eigenverbrauch: 74,7 %<br>Gesparte Strombezugskosten: 2 076 €<br>Strom-Bezug: 7 518 € (53 702 kWh)<br>Strom-Verkauf: 418 € (5 219 kWh)     | Autarkie: 24,6 %<br>Eigenverbrauch: 82,6 %<br>Gesparte Strombezugskosten: 2 294 €<br>Strom-Bezug: 7 390 € (52 072 kWh)<br>Strom-Verkauf: 288 € (3 597 kWh)    | Autarkie: 27,9 %<br>Eigenverbrauch: 93,5 %<br>Gesparte Strombezugskosten: 2 603 €<br>Strom-Bezug: 6 970 € (49 787 kWh)<br>Strom-Verkauf: 107 € (1 343 kWh)    |  |  |  |
|                                            | U5 | Autarkie: 43,7 %<br>Eigenverbrauch: 59,5 %<br>Gesparte Strombezugskosten: 4 088 €<br>Strom-Bezug: 5 456 € (38 970 kWh)<br>Strom-Verkauf: 1 653 € (20 658 kWh) | Autarkie: 52,8 %<br>Eigenverbrauch: 71,9 %<br>Gesparte Strombezugskosten: 4 938 €<br>Strom-Bezug: 4 576 € (32 683 kWh)<br>Strom-Verkauf: 1 149 € (14 361 kWh) | Autarkie: 42,2 %<br>Eigenverbrauch: 57,3 %<br>Gesparte Strombezugskosten: 3 933 €<br>Strom-Bezug: 5 594 € (39 954 kWh)<br>Strom-Verkauf: 1 746 € (21 822 kWh)  | Autarkie: 44,2 %<br>Eigenverbrauch: 60,0 %<br>Gesparte Strombezugskosten: 4 121 €<br>Strom-Bezug: 5 395 € (38 538 kWh)<br>Strom-Verkauf: 1 633 € (20 412 kWh) | Autarkie: 51 %<br>Eigenverbrauch: 69,2 %<br>Gesparte Strombezugskosten: 4 754 €<br>Strom-Bezug: 4 740 € (33 855 kWh)<br>Strom-Verkauf: 1 260 € (15 746 kWh)   |  |  |  |

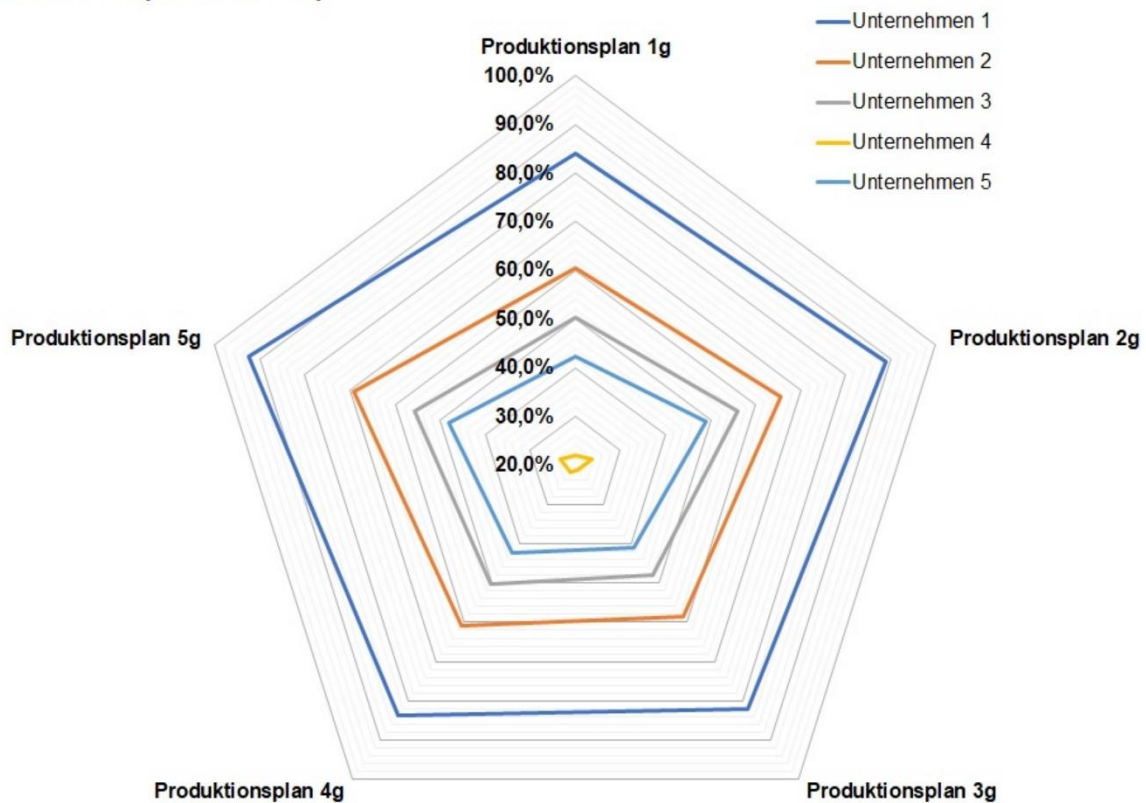
Abbildung 48: Detaillierte Ergebnisse der Simulationsdurchgänge

**Produktionsplan + Grundlast (2 kW) (Verbrauch ~ 85 000 kWh/A)**

|           | P1g                                                                                                                                                           | P2g                                                                                                                                                            | P3g                                                                                                                                                            | P4g                                                                                                                                                            | P5g                                                                                                                                                           |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>U1</b> | Autarkie: 84,1 %<br>Eigenverbrauch: 39,9 %<br>Gesparte Strombezugskosten: 9 846 €<br>Strom-Bezug: 1 936 € (13 829 kWh)<br>Strom-Verkauf: 8860 € (110 749 kWh) | Autarkie: 89,0 %<br>Eigenverbrauch: 42,2 %<br>Gesparte Strombezugskosten: 10 428 €<br>Strom-Bezug: 1 335 € (9 534 kWh)<br>Strom-Verkauf: 8 516 € (106 449 kWh) | Autarkie: 81,9 %<br>Eigenverbrauch: 38,8 %<br>Gesparte Strombezugskosten: 9 578 €<br>Strom-Bezug: 2 191 € (15 653 kWh)<br>Strom-Verkauf: 9 017 € (112 715 kWh) | Autarkie: 83,7 %<br>Eigenverbrauch: 39,7 %<br>Gesparte Strombezugskosten: 9 784 €<br>Strom-Bezug: 1 975 € (14 107 kWh)<br>Strom-Verkauf: 8 895 € (111 176 kWh) | Autarkie: 92,5 %<br>Eigenverbrauch: 43,7 %<br>Gesparte Strombezugskosten: 10 810 €<br>Strom-Bezug: 914 € (6 527 kWh)<br>Strom-Verkauf: 8 295 € (103 687 kWh)  |
| <b>U2</b> | Autarkie: 60,5 %<br>Eigenverbrauch: 63,8 %<br>Gesparte Strombezugskosten: 7 085 €<br>Strom-Bezug: 4 800 € (34 289 kWh)<br>Strom-Verkauf: 2 398 € (29 969 kWh) | Autarkie: 65,7 %<br>Eigenverbrauch: 69,2 %<br>Gesparte Strombezugskosten: 7 697 €<br>Strom-Bezug: 4 167 € (29 762 kWh)<br>Strom-Verkauf: 2 034 € (25 429 kWh)  | Autarkie: 58,7 %<br>Eigenverbrauch: 61,8 %<br>Gesparte Strombezugskosten: 6 861 €<br>Strom-Bezug: 5 009 € (35 780 kWh)<br>Strom-Verkauf: 2 526 € (31 578 kWh)  | Autarkie: 60,9 %<br>Eigenverbrauch: 64,1 %<br>Gesparte Strombezugskosten: 7 120 €<br>Strom-Bezug: 4 738 € (33 840 kWh)<br>Strom-Verkauf: 2 372 € (29 645 kWh)  | Autarkie: 69,2 %<br>Eigenverbrauch: 72,8 %<br>Gesparte Strombezugskosten: 8 092 €<br>Strom-Bezug: 3 731 € (26 653 kWh)<br>Strom-Verkauf: 1 802 € (22 523 kWh) |
| <b>U3</b> | Autarkie: 50,2 %<br>Eigenverbrauch: 85,6 %<br>Gesparte Strombezugskosten: 5 585 €<br>Strom-Bezug: 6 045 € (43 175 kWh)<br>Strom-Verkauf: 588 € (7 346 kWh)    | Autarkie: 55,9 %<br>Eigenverbrauch: 95,2 %<br>Gesparte Strombezugskosten: 6 548 €<br>Strom-Bezug: 5 358 € (38 274 kWh)<br>Strom-Verkauf: 195 € (2 433 kWh)     | Autarkie: 48,0 %<br>Eigenverbrauch: 81,7 %<br>Gesparte Strombezugskosten: 5 615 €<br>Strom-Bezug: 6 302 € (45 012 kWh)<br>Strom-Verkauf: 747 € (9 331 kWh)     | Autarkie: 50,2 %<br>Eigenverbrauch: 85,5 %<br>Gesparte Strombezugskosten: 5 872 €<br>Strom-Bezug: 6 032 € (43 083 kWh)<br>Strom-Verkauf: 593 € (7 408 kWh)     | Autarkie: 55,8 %<br>Eigenverbrauch: 94,9 %<br>Gesparte Strombezugskosten: 6 529 €<br>Strom-Bezug: 5 352 € (38 230 kWh)<br>Strom-Verkauf: 208 € (2 600 kWh)    |
| <b>U4</b> | Autarkie: 21,9 %<br>Eigenverbrauch: 92,4 %<br>Gesparte Strombezugskosten: 2 570 €<br>Strom-Bezug: 9 483 € (67 732 kWh)<br>Strom-Verkauf: 126 € (1 578 kWh)    | Autarkie: 23,7 %<br>Eigenverbrauch: 99,9 %<br>Gesparte Strombezugskosten: 2 780 €<br>Strom-Bezug: 9 266 € (66 186 kWh)<br>Strom-Verkauf: 160 € (20 kWh)        | Autarkie: 21,1 %<br>Eigenverbrauch: 88,5 %<br>Gesparte Strombezugskosten: 2 465 €<br>Strom-Bezug: 9 569 € (68 346 kWh)<br>Strom-Verkauf: 190 € (2 370 kWh)     | Autarkie: 21,9 %<br>Eigenverbrauch: 92 %<br>Gesparte Strombezugskosten: 2 558 €<br>Strom-Bezug: 9 468 € (67 630 kWh)<br>Strom-Verkauf: 133 € (1661 kWh)        | Autarkie: 23,4 %<br>Eigenverbrauch: 98,2 %<br>Gesparte Strombezugskosten: 2 735 €<br>Strom-Bezug: 9 286 € (66 329 kWh)<br>Strom-Verkauf: 30 € (375 kWh)       |
| <b>U5</b> | Autarkie: 42,2 %<br>Eigenverbrauch: 71,9 %<br>Gesparte Strombezugskosten: 4 938 €<br>Strom-Bezug: 7 027 € (50 192 kWh)<br>Strom-Verkauf: 1 149 € (14 363 kWh) | Autarkie: 49,1 %<br>Eigenverbrauch: 83,7 %<br>Gesparte Strombezugskosten: 5 750 €<br>Strom-Bezug: 6 186 € (44 186 kWh)<br>Strom-Verkauf: 668 € (8 345 kWh)     | Autarkie: 41,0 %<br>Eigenverbrauch: 69,7 %<br>Gesparte Strombezugskosten: 4 788 €<br>Strom-Bezug: 7 159 € (51 137 kWh)<br>Strom-Verkauf: 1 239 € (15 486 kWh)  | Autarkie: 47,5 %<br>Eigenverbrauch: 72,3 %<br>Gesparte Strombezugskosten: 4 968 €<br>Strom-Bezug: 6 969 € (49 778 kWh)<br>Strom-Verkauf: 1 131 € (14 134 kWh)  | Autarkie: 48,1 %<br>Eigenverbrauch: 81,8 %<br>Gesparte Strombezugskosten: 5 626 €<br>Strom-Bezug: 6 288 € (44 914 kWh)<br>Strom-Verkauf: 743 € (9 286 kWh)    |

Abbildung 49: Detaillierte Ergebnisse der Simulationsdurchgänge bei zusätzlicher Grundlast

### Autarkie (Grundlast)



### Eigenverbrauch (Grundlast)

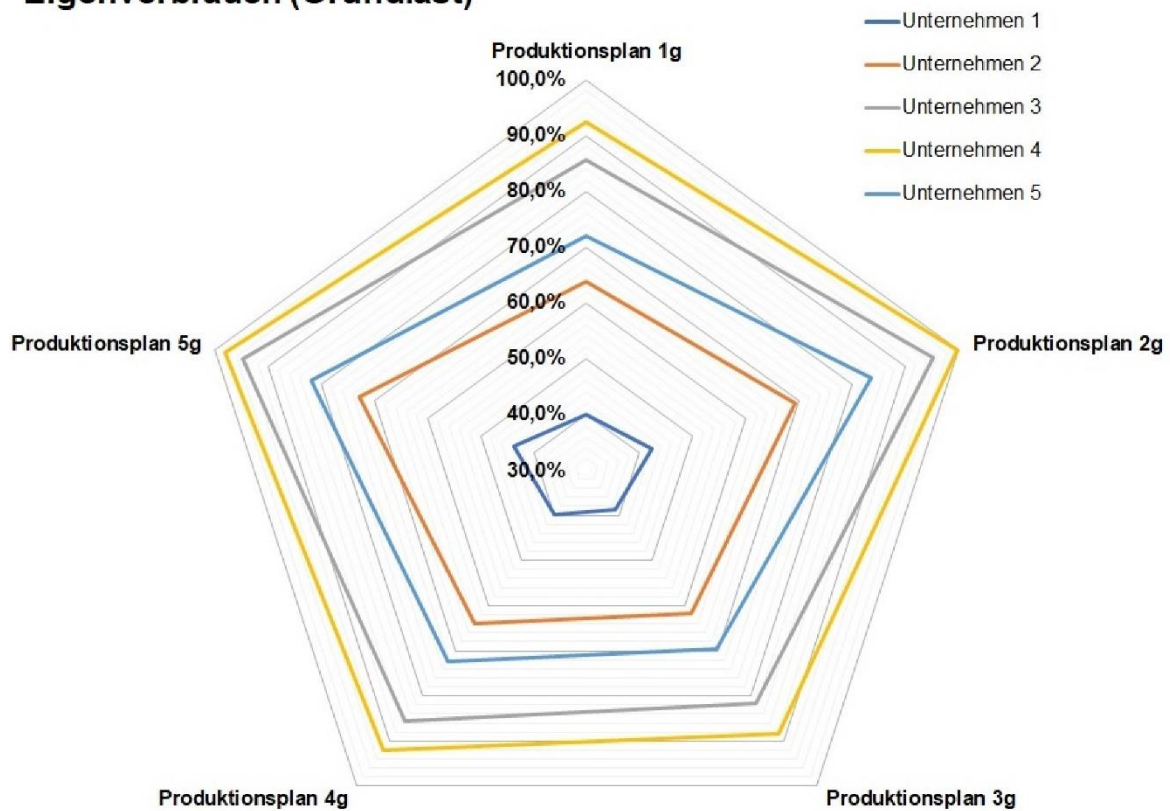
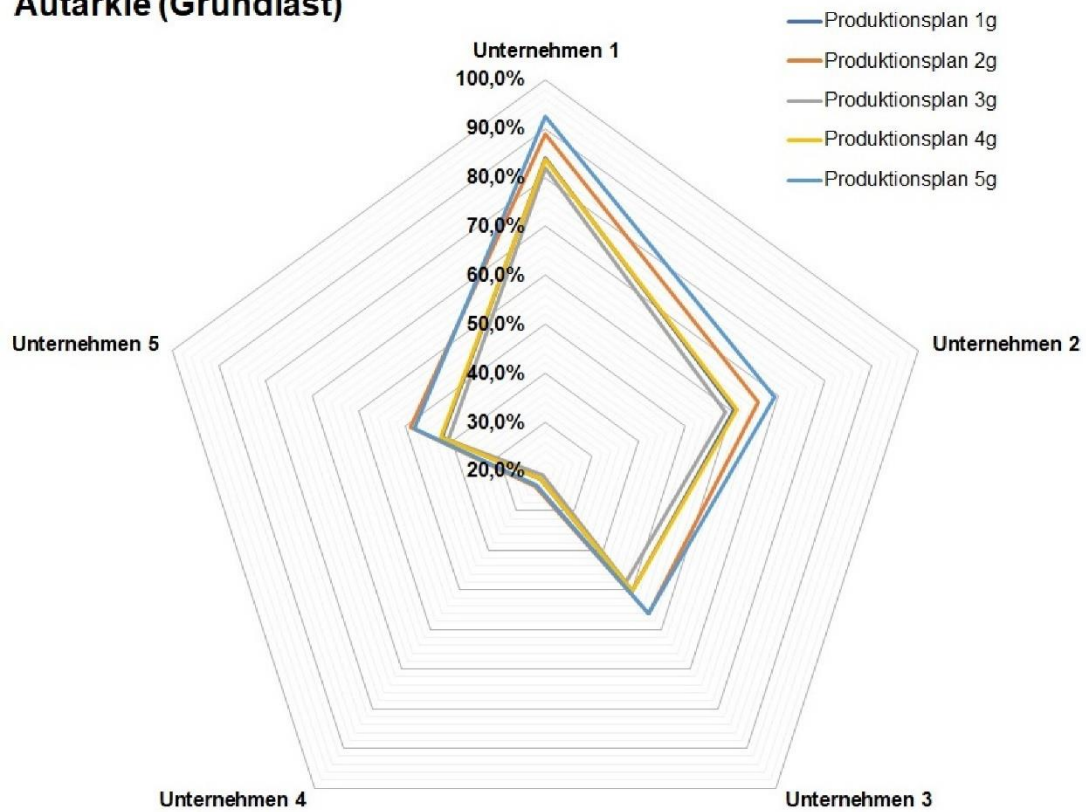


Abbildung 50: Netzdiagramme zu Autarkie und Eigenverbrauch mit Fokus auf Unterschiede zwischen den Unternehmen U1 bis U5 bei zusätzlicher Grundlast

### Autarkie (Grundlast)



### Eigenverbrauch (Grundlast)

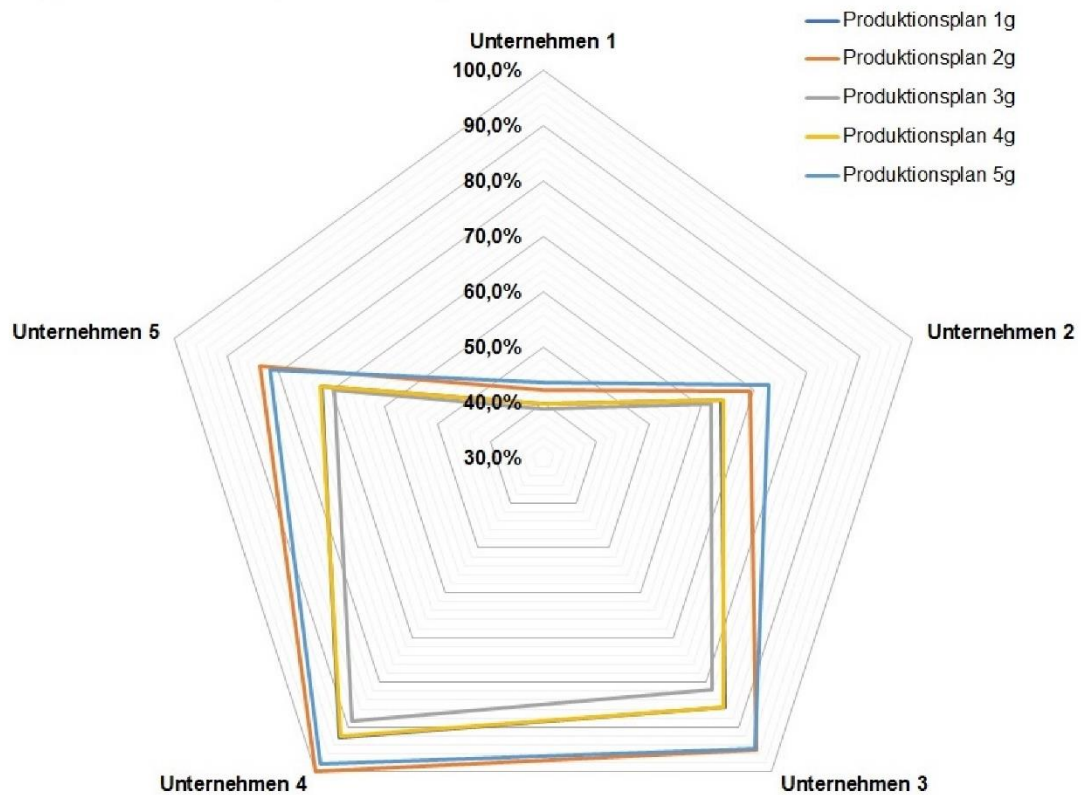


Abbildung 51: Netzdiagramme zu Autarkie und Eigenverbrauch mit Fokus auf Unterschiede zwischen den Produktionsplänen P1 bis P5 bei zusätzlicher Grundlast

## 6 Literaturverzeichnis

- Atabay, D., Dornmair, R., Hamacher, T., Keller, F., & Reinhart, G. (2014). Flexibilisierung des Stromverbrauchs in Fabriken. In *13. Symposium Energieinnovation* (pp. 1–17).
- Bazan, P., Steber, D., & German, R. (2017). Hybrid simulation and energy market based optimization of cement plants. *Computer Science - Research and Development*, 32(1–2), 65–77. <https://doi.org/10.1007/s00450-016-0305-8>
- Beier, J. (2017). *Simulation Approach Towards Energy Flexible Manufacturing Systems*. (C. Hermann & S. Kara, Eds.). Cham: Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-46639-2>
- Beier, J., Neef, B., Thiede, S., & Herrmann, C. (2016). Integrating on-site Renewable Electricity Generation into a Manufacturing System with Intermittent Battery Storage from Electric Vehicles. *Procedia CIRP*, 48, 483–488. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.04.057>
- Beier, J., Thiede, S., & Herrmann, C. (2017). Energy flexibility of manufacturing systems for variable renewable energy supply integration: Real-time control method and simulation. *Journal of Cleaner Production*, 141, 648–661. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.040>
- BINE. (2018). Leistung einer Windenergieanlage. Retrieved September 15, 2018, from <http://www.bine.info/publikationen/basisenergie/publikation/windenergie/wind-ist-potenziell-ertragreich/>
- Borshchev, A. (2014). Multi-method modelling: AnyLogic. In *Discrete-Event Simulation and System Dynamics for Management Decision Making* (pp. 248–279). Chichester, UK: John Wiley & Sons Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781118762745.ch12>
- Bougain, S., Gerhard, D., Nigischer, C., & Uğurlu, S. (2015). Towards Energy Management in Production Planning Software Based on Energy Consumption as a Planning Resource. *Procedia CIRP*, 26, 139–144. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.07.093>
- Brauner, G. (2016). *Energiesysteme: regenerativ und dezentral*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-12755-8>
- Bunse, K., Vodicka, M., & Schönsleben, P. (2011). Integrating energy efficiency performance in production management – gap analysis between industrial needs and scientific literature. *Journal of Cleaner Production*, 19(6–7), 667–679. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.11.011>
- Crastan, V. (2017). *Elektrische Energieversorgung 2*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-48965-9>
- Dröge, S. (2015). Das Pariser Abkommen 2015: Weichenstellung für das Klimaregime. *SWP-Studie*, (November). Retrieved from [https://www.politische-bildung.de/umwelt\\_international.html?&tx\\_lpbwebkatalog\\_pi1%5BshowUid%5D=9423&MP=660-837&cHash=6b85c2de7d855cd9d505bb58311707f7](https://www.politische-bildung.de/umwelt_international.html?&tx_lpbwebkatalog_pi1%5BshowUid%5D=9423&MP=660-837&cHash=6b85c2de7d855cd9d505bb58311707f7)

- Duflou, J. R., Sutherland, J. W., Dornfeld, D., Herrmann, C., Jeswiet, J., Kara, S., ... Kellens, K. (2012). Towards energy and resource efficient manufacturing: A processes and systems approach. *CIRP Annals*, 61(2), 587–609. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.05.002>
- Energiewerkstatt, & ISpace. (2018). Windatlas. Retrieved from [https://www.windatlas.at/disclaimer\\_windkarte.html](https://www.windatlas.at/disclaimer_windkarte.html)
- European Commission. (2018). Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS). Retrieved June 1, 2018, from [http://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/en/tools.html](http://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html)
- Franz, E., Erler, F., Langer, T., Schlegel, A., Stoldt, J., Richter, M., & Putz, M. (2017). Requirements and Tasks for Active Energy Management Systems in Automotive Industry. *Procedia Manufacturing*, 8, 175–182. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.02.022>
- Fraunhofer IAO. (2010). *Relevanz der Ressourceneffizienz für Unternehmen des produzierenden Gewerbes*. (R. Erhardt & N. Pastewski, Eds.). Fraunhofer Verlag.
- Ghadimi, P., Kara, S., & Kornfeld, B. (2015). Renewable energy integration into factories: Real-time control of on-site energy systems. *CIRP Annals*, 64(1), 443–446. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2015.04.114>
- Haag, H. (2013). *Eine Methodik zur modellbasierten Planung und Bewertung der Energieeffizienz in der Produktion*. Stuttgart (Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung, 11): Fraunhofer Verlag.
- Halstrup, D., & Schriever, M. (2018). Zur Akzeptanz von Stromspeichern in Unternehmen. *Zeitschrift Für Energiewirtschaft*, 42(1), 13–20. <https://doi.org/10.1007/s12398-017-0215-x>
- Hau, E. (2016). *Windkraftanlagen*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-53154-9>
- Heier, S. (2018). *Windkraftanlagen*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-8348-2104-1>
- Herrmann, C., & Thiede, S. (2009). Process chain simulation to foster energy efficiency in manufacturing. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 1(4), 221–229. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2009.06.005>
- Herrmann, C., Thiede, S., Kara, S., & Hesselbach, J. (2011). Energy oriented simulation of manufacturing systems – Concept and application. *CIRP Annals*, 60(1), 45–48. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2011.03.127>
- Joos, F. (2016). *Energiewende - Quo vadis?* (F. Joos, Ed.). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-11799-3>
- Keller, F., Braunreuther, S., & Reinhart, G. (2016). Integration of On-site Energy Generation into Production Planning Systems. *Procedia CIRP*, 48, 254–258. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.158>

- Keller, F., & Reinhart, G. (2016). Energy Supply Orientation in Production Planning Systems. *Procedia CIRP*, 40, 244–249. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.01.113>
- Keller, F., Schultz, C., Braunreuther, S., & Reinhart, G. (2016). Enabling Energy-Flexibility of Manufacturing Systems through New Approaches within Production Planning and Control. *Procedia CIRP*, 57, 752–757. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.130>
- Kerkhoff, J. (2015). Energieorientierte Produktionsplanung – Chancen für produzierende Unternehmen. *Ew-Magazin*, 8. Retrieved from [https://www.perfect-production.de/fileadmin/user\\_upload/PerfectProduction/ew\\_08-2015-41-45\\_eMES-Projekt.pdf](https://www.perfect-production.de/fileadmin/user_upload/PerfectProduction/ew_08-2015-41-45_eMES-Projekt.pdf)
- Kitchenham, B. (2004). *Procedures for performing systematic reviews*. Keele University. <https://doi.org/10.1.1.122.3308>
- Lacal Arantegui, R., & Jäger-Waldau, A. (2018). Photovoltaics and wind status in the European Union after the Paris Agreement. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 2460–2471. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.052>
- Liobikienė, G., & Butkus, M. (2017). The European Union possibilities to achieve targets of Europe 2020 and Paris agreement climate policy. *Renewable Energy*, 106, 298–309. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.01.036>
- Matzen, F. J., & Tesch, R. (2017). *Industrielle Energiestrategie*. (F. J. Matzen & R. Tesch, Eds.). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-07606-1>
- May, G., Stahl, B., & Taisch, M. (2016). Energy management in manufacturing: Toward eco-factories of the future – A focus group study. *Applied Energy*, 164, 628–638. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.11.044>
- May, G., Stahl, B., & Taisch, M. (2017). Energy management in manufacturing: From literature review to a conceptual framework. *Journal of Cleaner Production*, 167, 1464–1489. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.191>
- Mersch, H., Behnen, D., Schmitz, D., Eppe, U., Brecher, C., & Jarke, M. (2011). Gemeinsamkeiten und Unterschiede der Prozess- und Fertigungstechnik. *At - Automatisierungstechnik*, 59(1), 7–17. <https://doi.org/10.1524/auto.2011.0891>
- Müller, R., Loster, M., Volk, R., & Schultmann, F. (2018). CO<sub>2</sub>-based assessment for sustainable production planning in the metal processing industry. *Procedia Manufacturing*, 21, 289–296. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.123>
- Pechmann, A., & Zarte, M. (2017). Procedure for Generating a Basis for PPC Systems to Schedule the Production Considering Energy Demand and Available Renewable Energy. *Procedia CIRP*, 64, 393–398. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.033>
- Popp, R., Liebl, C., & Zäh, M. F. (2015). Technische Erfassung der Energieflexibilität und deren Umsetzung in der Produktion. *ZWF Zeitschrift Für Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 110(9), 505–509. <https://doi.org/10.3139/104.111388>

- Rackow, T., Kohl, J., & Canzaniello, A. (2015). Energy Flexible Production: Saving Electricity Expenditures by Adjusting the Production Plan. *Procedia CIRP*, 26, 235–240. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.07.179>
- Reinhart, G., & Schultz, C. (2014). Herausforderungen einer energieorientierten Produktionssteuerung. *ZWF Zeitschrift Für Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 109(1–2), 29–33. <https://doi.org/10.3139/104.111085>
- Sangwan, K. S., Herrmann, C., Soni, M. S., Jakhar, S., Posselt, G., Sihag, N., & Bhakar, V. (2018). Comparative Analysis for Solar Energy Based Learning Factory: Case Study for TU Braunschweig and BITS Pilani. *Procedia CIRP*, 69, 407–411. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.11.018>
- Schmidt, C., Li, W., & Thiede, S. (2015). A methodology for customized prediction of energy consumption in manufacturing industries. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 2(2), 163–172. <https://doi.org/10.1007/s40684-015-0021-z>
- Schönsleben, P. (2016). *Integrales Logistikmanagement*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-48334-3>
- Schröder, D. (2006). *Leistungselektronische Bauelemente*. New York. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/3-540-31735-X>
- Schuh, G., Prote, J.-P., & Luckert, M. (2017). Energieflexible Produktionsplanung und -steuerung. *ZWF Zeitschrift Für Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 112(12), 857–859. <https://doi.org/10.3139/104.111848>
- Schuh, G., & Stich, V. (2012). *Produktionsplanung und -steuerung 1*. (G. Schuh & V. Stich, Eds.) (4th ed.). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-25423-9>
- Schultz, C., Braun, S., Braunreuther, S., & Reinhart, G. (2017). Integration of Load Management into an Energy-oriented Production Control. *Procedia Manufacturing*, 8(October 2016), 144–151. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.02.017>
- Schultz, C., Braunreuther, S., & Reinhart, G. (2016). Method for an Energy-oriented Production Control. *Procedia CIRP*, 48, 248–253. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.04.058>
- Schultz, C., Sellmaier, P., & Reinhart, G. (2015). An Approach for Energy-oriented Production Control Using Energy Flexibility. *Procedia CIRP*, 29, 197–202. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.038>
- Schwab, A. J. (2006). *Elektroenergiesysteme*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-29665-2>
- Sihn, W., Sobottka, T., Heinzl, B., & Kamhuber, F. (2018). Interdisciplinary multi-criteria optimization using hybrid simulation to pursue energy efficiency through production planning. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2018.04.059>

- Sobottka, T., Kamhuber, F., & Sihn, W. (2017a). Energieeffizienz mittels optimierender Produktionsplanung und -steuerung. *ZWF Zeitschrift Für Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 112(9), 559–562. <https://doi.org/10.3139/104.111780>
- Sobottka, T., Kamhuber, F., & Sihn, W. (2017b). Increasing Energy Efficiency in Production Environments Through an Optimized, Hybrid Simulation-based Planning of Production and Its Periphery. *Procedia CIRP*, 61, 440–445. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.151>
- Sterner, M., & Stadler, I. (2017). *Energiespeicher - Bedarf, Technologien, Integration*. (M. Sterner & I. Stadler, Eds.) (2nd ed.). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-48893-5>
- Teiwes, H., Blume, S., & Herrmann, C. (2018). Energy Load Profile Analysis on Machine Level. *Procedia CIRP*, 69(May), 271–276. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.11.073>
- Thiede, S. (2012). *Energy Efficiency in Manufacturing Systems*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-25914-2>
- Unterberger, E., Eisenreich, F., & Reinhart, G. (2018). Design principles for energy flexible production systems. *Procedia CIRP*, 67, 98–103. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.12.183>
- Vogt, T., Kempen, S., & Böcker, J. (2014). Die Rolle von Batteriespeichern in KMU-Microgrids. *BWK Das Energie Fachmagazin*, 66(12), 52–57.
- Wagner, A. (2015). *Photovoltaik Engineering*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-48640-5>
- Weckmann, S., Kuhlmann, T., & Sauer, A. (2017). Decentral Energy Control in a Flexible Production to Balance Energy Supply and Demand. *Procedia CIRP*, 61, 428–433. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.212>
- Weeber, M., Lehmann, C., & Böhner, J. (2017). Augmenting Energy Flexibility in the Factory Environment. *Procedia CIRP*, 61, 434–439. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.12.004>
- Weinert, N., Chiotellis, S., & Seliger, G. (2011). Methodology for planning and operating energy-efficient production systems. *CIRP Annals*, 60(1), 41–44. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2011.03.015>
- Wesselak, V., & Voswinckel, S. (2016). *Photovoltaik – Wie Sonne zu Strom wird*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-48906-2>
- Wietschel, M., Ullrich, S., Markewitz, P., & Schulte, F. (2015). *Energietechnologien der Zukunft*. (M. Wietschel, S. Ullrich, P. Markewitz, F. Schulte, & F. Genoese, Eds.). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-07129-5>
- ZAMG. (2015). *Windzonierungskarte für Kleinwindkraftanlagen für Wien*. Wien. Retrieved from <https://www.wien.gv.at/stadtentwicklung/energie/pdf/windzonierungskarte.pdf>

- Zapf, M. (2017). *Stromspeicher und Power-to-Gas im deutschen Energiesystem*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-15073-0>

## 7 Abbildungsverzeichnis

|                                                                                                                                                                            |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Abbildung 1:</b> Jahreszeitenabhängige Globalstrahlung in Wien auf horizontale Fläche (Brauner, 2016, S. 63) .....                                                      | <b>12</b> |
| <b>Abbildung 2:</b> Globalstrahlung in Europa in kWh/m <sup>2</sup> im Jahr (Brauner, 2016, S. 63) .....                                                                   | <b>13</b> |
| <b>Abbildung 3:</b> Jährliche Globalstrahlungswerte für die Stadt Kassel in kWh/m <sup>2</sup> (Wesselak & Voswinckel, 2016, S. 26) .....                                  | <b>14</b> |
| <b>Abbildung 4:</b> Vorgänge in einer bestrahlten Solarzelle (Wietschel, Ullrich, Markewitz, & Schulte, 2015, S. 124) .....                                                | <b>15</b> |
| <b>Abbildung 5:</b> Windrotorformen mit vertikaler Drehachse (Hau, 2016, S. 68) .....                                                                                      | <b>17</b> |
| <b>Abbildung 6:</b> Windrotorform mit horizontaler Drehachse (Hau, 2016, S. 73) .....                                                                                      | <b>17</b> |
| <b>Abbildung 7:</b> Messungen in 10m Höhe, sowie Weibull- und Rayleigh-Verteilung für 30m und 50m Höhe (Heier, 2018, S. 478) .....                                         | <b>19</b> |
| <b>Abbildung 8:</b> Mittlere Jahreswindgeschwindigkeiten (50m) in Österreich (Energiewerkstatt & ISpace, 2018) .....                                                       | <b>20</b> |
| <b>Abbildung 9:</b> Mittlere Jahreswindgeschwindigkeiten (10m) im Großraum Wien (ZAMG, 2015, S. 24) .....                                                                  | <b>21</b> |
| <b>Abbildung 10:</b> Unterteilung von Stromspeichern nach physikalisch-energetischen Gesichtspunkten (Zapf, 2017, S. 97) .....                                             | <b>24</b> |
| <b>Abbildung 11:</b> Einsatzmöglichkeiten und Nutzenpotenziale von Stromspeichern aus unternehmerischer Sicht (Halstrup & Schriever, 2018, S. 3) .....                     | <b>26</b> |
| <b>Abbildung 12:</b> Schlüsselfaktoren im Rahmen des Energiemanagements in der produzierenden Industrie (in Anlehnung an May, Stahl, Taisch & Kiritsis, 2017, S. 11) ..... | <b>28</b> |
| <b>Abbildung 13:</b> Energieregelskreis im Kontext der Automatisierungspyramide (in Anlehnung an (Kerkhoff, 2015, S. 2); (Haag, 2013, S. 43)) .....                        | <b>30</b> |
| <b>Abbildung 14:</b> Mögliche Merkmale und Ausprägungen der Produktion eines Unternehmens (in Anlehnung an Schönsleben, 2016, S.190/194) .....                             | <b>32</b> |
| <b>Abbildung 15:</b> ICT als Wegbereiter im Energiemanagement (Bunse, Vodicka, & Schönsleben, 2011, S. 4) .....                                                            | <b>39</b> |
| <b>Abbildung 16:</b> Zusammenspiel energierelevanter Systeme eines Unternehmens (vgl. Atabay et al., 2014, S. 4f).....                                                     | <b>40</b> |
| <b>Abbildung 17:</b> Diskrepanzen innerhalb des Angebot-Nachfrage-Verhältnisses (Schultz, Sellmaier, & Reinhart, 2015, S. 3) .....                                         | <b>41</b> |

|                                                                                                                                                                               |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Abbildung 18:</b> Concept Map zu den Anforderungen an kombinierte EM/PPS-Systeme.....                                                                                      | <b>45</b> |
| <b>Abbildung 19:</b> Die EnergyBlocks Methodik (Weinert et al., 2011, S. 2) .....                                                                                             | <b>47</b> |
| <b>Abbildung 20:</b> Ansatz energieorientierter ERP und MES (Keller, Schultz, et al., 2016, S. 3) .....                                                                       | <b>49</b> |
| <b>Abbildung 21:</b> Energieoptimierte Produktionsplanung (Keller, Schultz, et al., 2016, S. 4) .....                                                                         | <b>49</b> |
| <b>Abbildung 22:</b> Energieorientierte Produktionssteuerung mit Algorithmus zur Auftragsfreigabe (in Anlehnung an Schultz et al., 2017, S. 4f) .....                         | <b>51</b> |
| <b>Abbildung 23:</b> Energieorientierte PPS (Keller, Braunreuther, et al., 2016, S. 3).....                                                                                   | <b>53</b> |
| <b>Abbildung 24:</b> PPS im Kontext von Energiequellen, Stromspeicher und -märkten (Atabay et al., 2014, S. 7) .....                                                          | <b>54</b> |
| <b>Abbildung 25:</b> Beeinflussung und Gestaltung von Lastkurven (Beier, 2017, S. 41)....                                                                                     | <b>55</b> |
| <b>Abbildung 26:</b> Konzept zur Echtzeit-Steuerung von Fertigungssystemen im Kontext der Einbindung von dezentralen, variablen Energiequellen (Beier et al., 2017, S. 6).... | <b>57</b> |
| <b>Abbildung 27:</b> Elektroautos im Unternehmenssystem (Beier, Neef, Thiede, & Herrmann, 2016, S. 3) .....                                                                   | <b>58</b> |
| <b>Abbildung 28:</b> Ausschnitt aus den Datensätzen zur Globalstrahlung/Windgeschwindigkeit (A) und zum Stromverbrauch der 3D-Drucker-Fertigung (B).....                      | <b>63</b> |
| <b>Abbildung 29:</b> Eigenschaften der Unternehmen U1 bis U5 im Überblick .....                                                                                               | <b>66</b> |
| <b>Abbildung 30:</b> Eigenschaften der Produktionspläne P1 bis P5 im Überblick .....                                                                                          | <b>67</b> |
| <b>Abbildung 31:</b> Aktueller und kumulierter Output der PV-Anlage während der Simulation.....                                                                               | <b>69</b> |
| <b>Abbildung 32:</b> Aktueller und kumulierter Output der Kleinwindkraftanlage während der Simulation.....                                                                    | <b>70</b> |
| <b>Abbildung 33:</b> Lastgang des Stromverbrauchs der 3D-Drucker-Herstellung .....                                                                                            | <b>71</b> |
| <b>Abbildung 34:</b> Abgleich von Stromangebot und -nachfrage (oben) und daraus resultierende Überschüsse bzw. Defizite (unten).....                                          | <b>72</b> |
| <b>Abbildung 35:</b> Stromangebots- und nachfragekurve im Vergleich .....                                                                                                     | <b>72</b> |
| <b>Abbildung 36:</b> Programmcode zur Beschreibung des Main-Agenten .....                                                                                                     | <b>73</b> |

|                                                                                                                                                                            |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Abbildung 37:</b> Implementierte Systematik des Main-Agenten in Anylogic .....                                                                                          | <b>75</b> |
| <b>Abbildung 38:</b> Anzahl der Batterieladezyklen (oben) und variabler Ladestand des Batteriespeichers (unten) .....                                                      | <b>76</b> |
| <b>Abbildung 39:</b> Autarkiegrad (blau), Eigenverbrauchsanteil (grün), Einspeisung in das öffentliche Stromnetz (gelb), Bezug aus dem öffentlichen Stromnetz (grau) ..... | <b>77</b> |
| <b>Abbildung 40:</b> Benutzeroberfläche während eines Simulationsdurchgangs .....                                                                                          | <b>79</b> |
| <b>Abbildung 41:</b> Netzdiagramme zu Autarkie und Eigenverbrauch mit Fokus auf Unterschiede zwischen den Unternehmen U1 bis U5.....                                       | <b>84</b> |
| <b>Abbildung 42:</b> Netzdiagramme zu Autarkie und Eigenverbrauch mit Fokus auf Unterschiede zwischen den Produktionsplänen P1 bis P5 .....                                | <b>85</b> |
| <b>Abbildung 43:</b> Produktionsplan P1.....                                                                                                                               | <b>90</b> |
| <b>Abbildung 44:</b> Produktionsplan P2.....                                                                                                                               | <b>91</b> |
| <b>Abbildung 45:</b> Produktionsplan P3.....                                                                                                                               | <b>92</b> |
| <b>Abbildung 46:</b> Produktionsplan P4.....                                                                                                                               | <b>93</b> |
| <b>Abbildung 47:</b> Produktionsplan P5.....                                                                                                                               | <b>94</b> |
| <b>Abbildung 48:</b> Detaillierte Ergebnisse der Simulationsdurchgänge .....                                                                                               | <b>95</b> |
| <b>Abbildung 49:</b> Detaillierte Ergebnisse der Simulationsdurchgänge bei zusätzlicher Grundlast.....                                                                     | <b>96</b> |
| <b>Abbildung 50:</b> Netzdiagramme zu Autarkie und Eigenverbrauch mit Fokus auf Unterschiede zwischen den Unternehmen U1 bis U5 bei zusätzlicher Grundlast.....            | <b>97</b> |
| <b>Abbildung 51:</b> Netzdiagramme zu Autarkie und Eigenverbrauch mit Fokus auf Unterschiede zwischen den Produktionsplänen P1 bis P5 bei zusätzlicher Grundlast .....     | <b>98</b> |

## 8 Tabellenverzeichnis

|                                                                                                                                                     |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Tabelle 1:</b> Deutschlands industrieller Energiebedarf nach Sektoren und Anwendungsarten im Jahre 2014 (in Anlehnung an Brauner, 2016, S. 197)  | <b>22</b> |
| <b>Tabelle 2:</b> Bedeutenden technische und ökonomische Parameter der elektrochemischen Speicher (in Anlehnung an Sterner & Stadler, 2017, S. 649) | <b>26</b> |
| <b>Tabelle 3:</b> Verwendete Suchbegriffe der Literaturrecherche                                                                                    | <b>34</b> |
| <b>Tabelle 4:</b> Ursprung und Aufteilung der Kernliteratur                                                                                         | <b>35</b> |

## 9 Abkürzungsverzeichnis

|                  |                                                   |
|------------------|---------------------------------------------------|
| Abb.             | Abbildung                                         |
| bzw.             | beziehungsweise                                   |
| CSV              | Comma-separated values                            |
| DE               | Discrete Event                                    |
| d.h.             | das heißt                                         |
| DIN              | Deutsches Institut für Normung                    |
| DSM              | Demand-Side-Management                            |
| DR               | Demand Response                                   |
| €                | Euro                                              |
| EM               | Energiemanagement                                 |
| EN               | Europäische Norm                                  |
| EnMs             | Energiemanagementsystem                           |
| ERP              | Enterprise Resource Planning                      |
| etc.             | et cetera                                         |
| GHD              | Gewerbe, Handel und Dienstleistungen              |
| h                | Stunde                                            |
| ICT              | Information and Communications Technology         |
| ISO              | International Organization for Standardization    |
| kg               | Kilogramm                                         |
| kW               | Kilowatt                                          |
| KWEA             | Kleinwindenergieanlage                            |
| kWh              | Kilowattstunde                                    |
| MES              | Manufacturing Execution System                    |
| max.             | Maximal                                           |
| m/s              | Meter pro Sekunde                                 |
| OPC UA           | Open Platform Communications Unified Architecture |
| PDCA             | Plan, Do, Check, Act                              |
| PPS              | Produktionsplanung und -steuerung                 |
| PV               | Photovoltaik                                      |
| PVGIS            | Photovoltaic Geographical Information System      |
| SD               | System Dynamics                                   |
| sog.             | sogenannt                                         |
| TGA              | Technische Gebäudeausrüstung                      |
| VEE              | Variable erneuerbare Energien                     |
| vgl.             | vergleiche                                        |
| W/m <sup>2</sup> | Watt pro Quadratmeter                             |
| WEA              | Windenergieanlage                                 |
| z.B.             | zum Beispiel                                      |
| ZAMG             | Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik    |