Energieeffizienz, Fabrikplanung, Energiemanagement

Netzmanagement für ein industrielles DC-Smart Grid

Dezentraler Netzmanagementansatz zur effizienten Sicherung der Energieversorgung eines industriellen DC-Smart Grids

Sebastian Weckmann, M. Sc. (1)
Dipl.-Wirt.-Ing. Timm Kuhlmann (2)
Darian Schaab, M. Sc. (1)
Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Alexander Sauer (1)

(1) Universität Stuttgart - Institut für Energieeffizienz in der Produktion EEP
Nobelstraße 12
70569 Stuttgart
(2) Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA
Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Im Zuge einer wachsenden Volatilität in der Energieversorgung stehen Industrieunternehmen zunehmend vor der Herausforderung sich flexibel dem Energieangebot anzupassen. Ein neuer Ansatz für eine industrielle Energieversorgung, die den zukünftigen Anforderungen der industriellen Produktion gerecht wird, ist die Umstellung der klassischen Wechselspannungsversorgung (AC) auf eine Gleichspannungsversorgung (DC). Eine auf diese Weise mit Energie versorgte Produktion bietet zahlreiche Vorteile. Der Einsatz eines intelligenten Netzmanagement ist der Schlüssel um flexibel und robust auf schwankende Netzqualität und Energieangebote reagieren zu können
Network managment for a smart industrial DC-Grid
Abstract (englisch) Due to an increasing volatility in the energy supply, industrial companies are faced with the challenge of flexibly adapting their energy consumption to the energy supply. A new approach to an industrial power grid, that meets the future requirements of industrial production, is the conversion of the classic AC power supply to a DC power supply. A DC power supply provides numerous advantages for an industrial plant. Intelligent network management is the key to react flexibly and robustly to fluctuating power quality and energy supply.

1 Danksagung

Die Realisierung dieses Vorhabens wird durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie gefördert und mit dem Engagement von 16 Unternehmen, 4 Forschungsinstituten und einem Verband in Deutschland vorangetrieben (Förderkennzeichen 03ET7558A bis N; DC-INDUSTRIE)

2. Einleitung

Die Energiewende und eine damit verbundene zunehmende Integration volatiler Energieerzeugung durch regenerative Energiequellen im Energiesystem erfordern wachsende Anstrengungen im Bereich der Energieeffizienz und der Energieflexibilität [1,2]. Darüber hinaus sind insbesondere im industriellen Umfeld die Anforderungen an Spannungsqualität und eine gesicherte, stabile und unterbrechungsfreie Energieversorgung vor dem Hintergrund steigernder technologischer Anforderungen im Produktionsprozess existenziell. Es ist zu beachten, dass zwar Unterbrechungen der Stromversorgung im Bereich von 3 Minuten und länger seit Jahren in Deutschland zurückgehen [3], jedoch die Häufigkeit und die Auswirkungen von Kurzzeitunterbrechungen von unter drei Minuten steigen [4].
Ein neuer Ansatz für eine industrielle Energieversorgung, die den zukünftigen Anforderungen der industriellen Produktion gerecht wird, ist die Umstellung der klassischen Wechselspannungsversorgung (AC) auf eine Gleichspannungsversorgung (DC). Laut einer Vorstudie des Zentralverbands der Elektroindustrie (ZVEI) ergeben sich durch die Nutzung einer DC-Versorgung vier Potenzialfelder: Energetische, Gerätetechnische, Installations- und Verfügbarkeits-Potenziale (Bild
1)

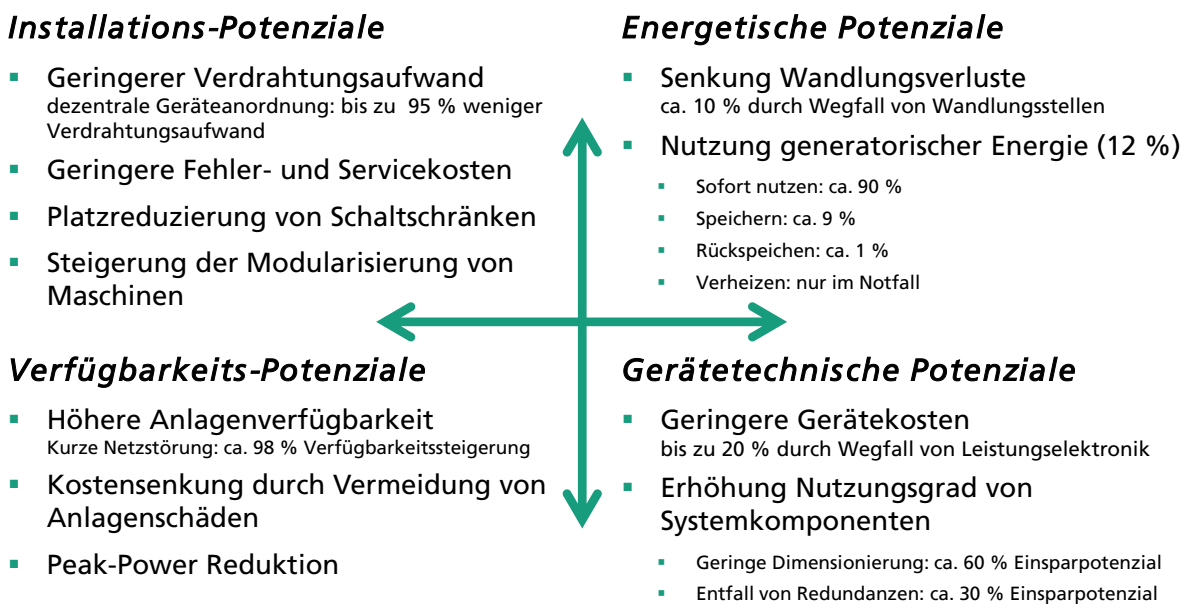

Bild 1: Potenziale der industriellen DC-Versorgung [5]

Zur Erforschung technischer Lösungen eines DC-Versorgungssystems in der Produktion fördert das BMWi das Projekt „DC-INDUSTRIE: Intelligentes offenes DC-Netz in der Industrie für hocheffiziente Systemlösungen mit elektrischen Antrieben“.
Um sowohl die energetischen Potenziale als auch die Verfügbarkeits-Potenziale von DC-Netz in der Produktion im tiefgreifenden Umfang zu heben, ist ein intelligentes und dynamisches Netzmanagement von Nöten. Dabei sind insbesondere Anforderungen von industriellen Anwendern, die im ersten Schritt des Projektes erfasst wurden, Voraussetzung für eine praxisorientierte Entwicklung. In diesem Zusammenhang können drei wesentliche Grundanforderungen an das Netzmanagement identifiziert werden:

- Die Ausfallsicherheit des Versorgungssystems ist zu gewährleisten. Dabei müssen sowohl Kurzzeitunterbrechungen (Störungen 90 – 200 ms) ohne Produktionsbeeinflussung abgesichert werden als auch Einspeiseeinbußen von bis zu 30 % des normalen Energiebezuges bis zu einer Stunde überbrückt werden.
- Das Netz selber muss leicht anpassbar und erweiterbar sein, ohne eine Rekonfiguration des Energienetzes durchführen zu müssen.
- Der Betrieb des Netzmanagements selbst muss robust sein und darf keinen störenden Einfluss auf die Sicherheit des Energienetzes haben [6].

3. Netzmanagement in industriellen Energiesystemen
Netzmanagement ist ein Begriff ohne normative oder wissenschaftlich allgemein anerkannte Definition. Im Gegensatz zum Energiemanagement, welches in der VDI 4602 und der ISO 50001 genau in Funktionsumfang, Anwendungsfokus und Zielstellung definiert ist, existieren für das Netzmanagement Erläuterungen einzelner Unternehmen. So beschreibt ABB in seinem Glossar [7] Netzmanagement als „ein System zur Überwachung sämtlicher Aspekte eines Stromnetzes (Betrieb und Wartung) unter Einbindung der Netzbetriebsführung und Betriebsmittelverwaltung (Asset-Management)“. Dabei wird die Netzbetriebsführung als Überwachung und Regelung des Stromnetzes zur Erhaltung des Leistungsflusses und zum Ausbalancieren des Gleichgewichts zwischen Energieerzeugung und -verbrauch definiert. Ergänzend definiert das Energiewirtschaftsgesetz (EnWG) die Rolle der Systemdienstleistungen, die von einem industriellen DC-Netzmanagement, welches Produzenten, Verbraucher und Speicher in einem Versorgungnetz integriert, ebenfalls übernommen werden müssen. Wesentlich sind hier die Rollen der Spannungshaltung, der Betriebsführung und dem Versorgungswiederaufbau nach Stromausfall. Die Frequenzhaltung spielt in einem DC-Netz keine Rolle. Hier wird die Netzspannung zur Regelgröße. Das Netzmanagement kann

demnach in die Bereiche Betriebsmittelverwaltung, Versorgungsqualität, Netzstabilität und optimierte Betriebsführung gegliedert werden (Bild 2).

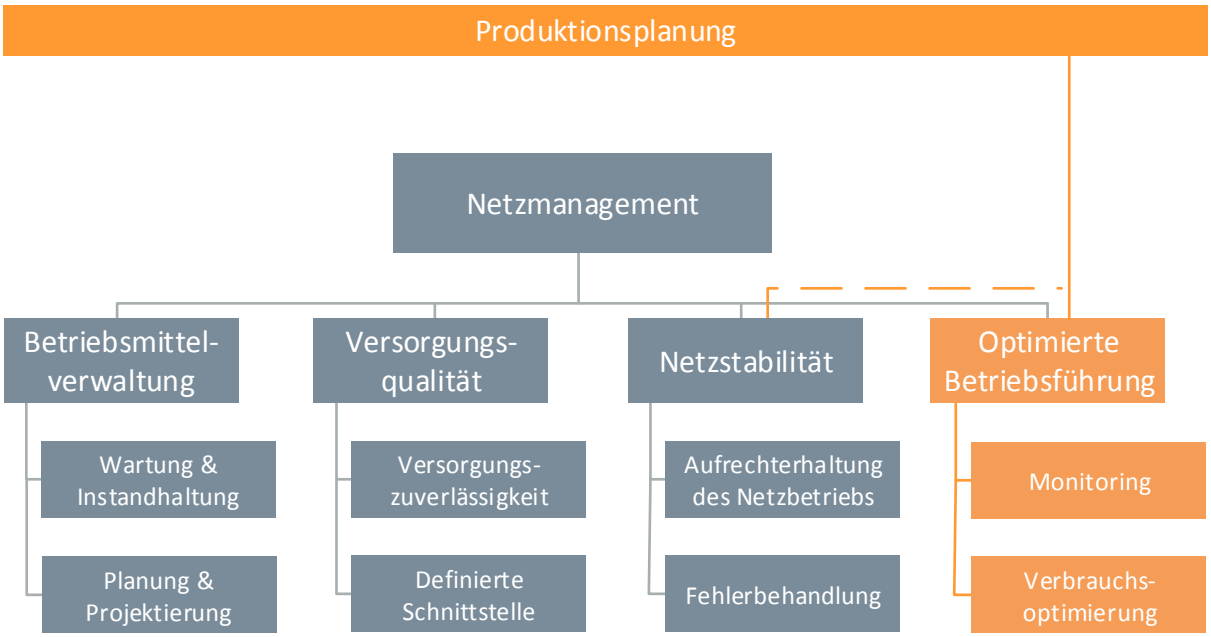

Bild 2: Durch das Netzmanagement realisierte Funktionen

Die **Betriebsmittelverwaltung** fast alle Funktionen zusammen, die sich mit der Planung und der Instandhaltung des DC-Netzes beschäftigen. Es geht hier um betriebsvorgelagerte Aufgaben sowie parallel zum Betrieb wahrgenommene Aufgaben.
Die Bereitstellung von elektrischer Energie in der vom Verbraucher benötigten Qualität wird unter dem Begriff der **Versorgungsqualität** zusammengefasst. Unter diesen Punkt fällt die Versorgungszuverlässigkeit, deren Ziel es ist die Anzahl und Dauer von Unterbrechungen in der Versorgung zu minimieren und Schnittstellen für die Verbindungen zwischen Geräten und Versorgungsnetz zu definieren.
Der **Netzstabilität** sind alle planerischen und technischen Tätigkeiten zugeordnet, die für einen sicheren und stabilen Betrieb des Netzes notwendig sind. Darunter fällt zum Beispiel die Lastflussregelung, die den Netzbetrieb während der Laufzeit aufrechterhält. Im Fall von höherer Gewalt sieht das Netzmanagement Rückfallszenarien vor, die einen sicheren Zustand garantieren. Diese in der Fehlerbehandlung verorteten Maßnahmen betreffen zum Beispiel Überstromsicherungen oder Maßnahmen im Fall eines Blitzeinschlags.
Die **optimierte Betriebsführung** kann in die grundlegenden Bereiche der Zustandsüberwachung und der Verbrauchsoptimierung untergliedert werden. Hierunter können zum Beispiel Mechanismen zur Überwachung, Vermessung oder Fehlerlokalisierung des Netzes verstanden werden. Eine weitere Möglichkeit zur optimalen Betriebsführung liegt in der Energieverbrauchsoptimierung in Abhängigkeit der Produktionsziele und in Anlehnung an das Energiemanagement.
Zusammenfassend ist das primäre Ziel des Netzmanagements die gezielte Verteilung und Bereitstellung von elektrischer Energie in der notwendigen Qualität und Quantität unter Berücksichtigung von Sicherheitsaspekten. Das Netzmanagement sollte es ermöglichen, historisch gewachsene Erzeuger- und Verbraucherstrukturen einzubinden, und einen schrittweisen Wandel hin zu einer zukünftig optimierten Betriebsführung zu fördern.

4. Dezentraler Regelansatz des DC-Netzmanagements

Um sowohl die industriellen Anforderungen als auch die Funktionen des DC-Netzmanagements umzusetzen, bedarf es einer Strukturierung und Kategorisierung der verschiedenen Teilnehmer im DC-Netz. Aufbauend auf der Teilnehmerkategorisierung kann ein teilnehmerkategoriebezogenes Netzmanagement eingeführt werden.

4.1 Teilnehmerstruktur im DC-Netz

Die Teilnehmer im DC-Netz unterscheiden sich in der Bereitstellung oder Nutzung von Energie: Consumer, Prosumer, Producer und Sicherheitseinrichtungen. Ändern diese Netzteilnehmer ihren Zustand in Abhängigkeit von Informationen des Netzes werden sie als netzabhängig steuerbar (aktiv) bezeichnet. Alle weiteren Netzteilnehmer sind nicht netzabhängig steuerbar und werden als (passiv) bezeichnet (Bild 3).

Consumer wandeln elektrische Energie im Zuge eines Produktionsprozesses, um eine wertschöpfende Tätigkeit auszuführen. Das Netz stellt dabei die vom Consumer angeforderte Energie bereit. Kann ein Consumer unter Berücksichtigung der Anforderungen aus Prozess und Produktionsplanung den Leistungsbedarf aufgrund des Netzzustands ändern, ist er aktiver Teilnehmer am Netzmanagement und wird als aktiver Consumer definiert. Andernfalls wird dieser als passiver Consumer definiert.
Prosumer können in Abhängigkeit vom Prozess Energie aus dem Netz aufnehmen oder Energie in das Netz einspeisen. Prosumer können grundsätzlich in zwei Typen untergliedert werden. Bezieht oder rekuperiert der Prosumer Energie als passiver Teilnehmer ohne Einfluss des Netzmanagements, wird er als Prosumer passiv bezeichnet. Typische Beispiele für Prosumer ohne Einfluss des Netzmanagements sind Servomotoren die in Abhängigkeit des Prozesses Energie beziehen und in das Netz rückspeisen. Wird der Leistungsbezug und die Rückspeisung über den Netzzustand gesteuert ist der Prosumer ein aktiver Teilnehmer. Ein Beispiel dafür sind Energiespeicher, diese dienen keinem übergeordneten Produktionsprozess und sind so in Abhängigkeit des Netzes steuerbar.
Die im Netz abrufbare Energie wird hauptsächlich von **Producern** bereitgestellt. Die Energie stammt von einem übergeordneten Versorger (z. B. ein externes Versorgungsnetz) oder einer Eigenerzeugungsanlage (z. B. Photovoltaikanlage). Ist die Einspeiseleistung aufgrund des Energiebezugs im Netz gesteuert wirkt der Producer stabilisierend und wird als Producer aktiv bezeichnet. Ist die Einspeiseleistung nicht gesteuert wird der Producer als passiv definiert.
Sicherheitseinrichtungen sind essentieller Teil des Netzaufbaus, die vor Zerstörung, Gefahren durch Fehler, Ausfälle oder Missbrauch schützen oder die Auswirkungen verringern.

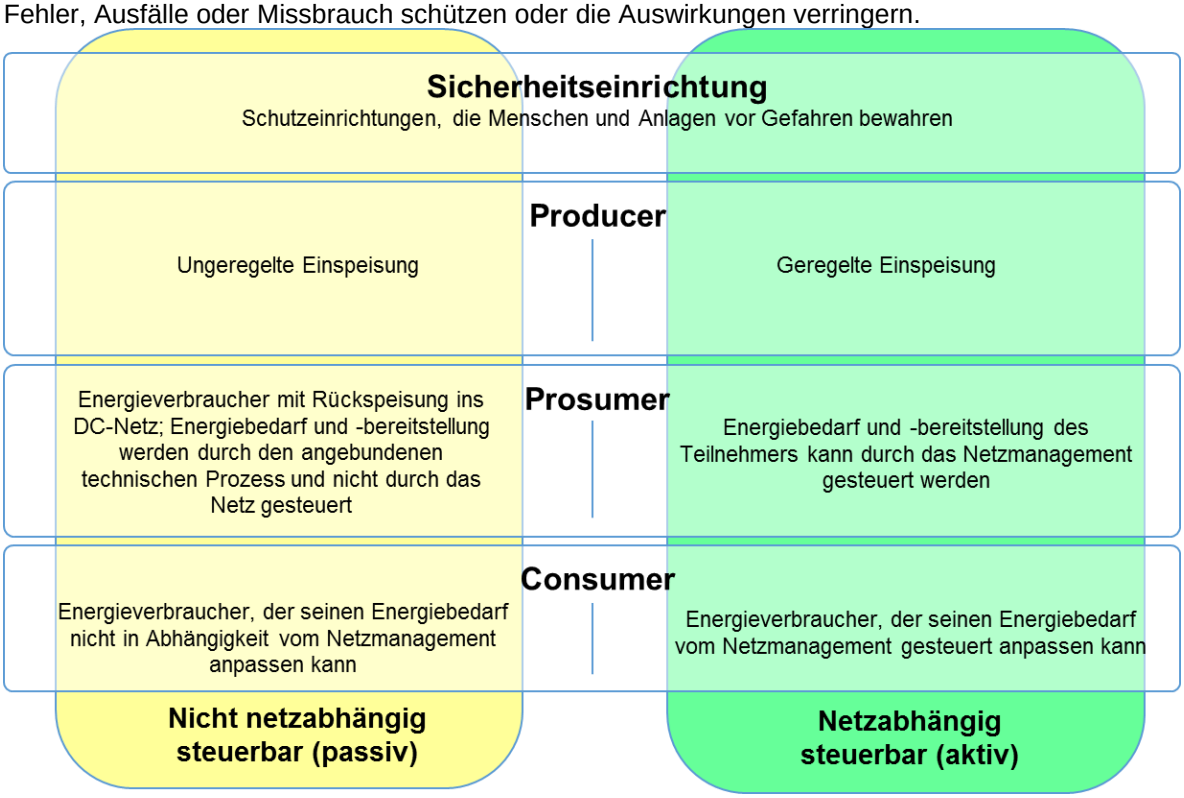

Bild 3: Netzteilnehmer im DC-Netz, strukturiert nach Funktionen hinsichtlich Energiebereitstellung und –nutzung

4.2 Teilnehmerbezogenes Netzmanagement von DC-Netzen
Wesentlicher Systemdienst eines DC-Netzes ist das Lastmanagement, welches Energiebezug und -einspeisung ausbalanciert. Hierfür müssen Informationen über eingespeiste und abgerufene Leistung in Echtzeit zwischen den Teilnehmern ausgetauscht werden. Der Spannungspegel des DC-Versorgungssystem (DC-BUS) stellt ein analoges Kommunikationssignal dar, welches zu jeder Zeit bei jedem Teilnehmer anliegt. Mit diesem Signal können Informationen zum Leistungsbezug und der -einspeisung aller Teilnehmer übermittelt werden. Es kann daher sowohl zur Lastflusssteuerung als auch als zum Energiemanagement genutzt werden.
Der Lastfluss im Gesamtsystem kann über die Realisierung verteilter Voltage-Droop-Regelungen balanciert werden [8, 9]. Aktive Teilnehmer mit Regelfunktion simulieren eine veränderliche (ggf. nicht-lineare) Strom-Spannungs-Charakteristik an der Anschlussklemme, die im Folgenden als Regelkurve bezeichnet wird. Jedes Gerät stellt mit steigendem Strom eine sinkende Klemmenspannung bereit. Werden mehrere aktive Teilnehmer zusammengeschaltet ergibt sich in Abhängigkeit der am Netz

vorhandenen Last und der Regelkurven eine Gleichgewichtsspannung. Wird dieses Gleichgewicht durch eine auftretende Last gestört, reagieren z. B. aktive Prosumer (z. B. Speicher) wesentlich empfindlicher auf die Spannungsabsenkung und tragen den wesentlichen Teil des fluktuierenden Leistungsbedarfs.
Diese Regelung eignet sich nicht nur zum Ausbalancieren der Leistungen, sondern ermöglicht durch eine Lageverschiebung der Regelkurven auch eine Priorisierung der Producer. Zum Beispiel liefert eine PV-Anlage in erster Annahme einen konstanten maximalen Einspeisestrom über den zulässigen Spannungsbereich. In Abhängigkeit der Last kann so die Netzversorgung dezentral geregelt werden. Ist der Laststrom geringer als der durch die PV-Anlage gelieferte Strom, speist die Netzeinspeisung Energie von der PV-Anlage zurück in das externe Netz. Erst wenn die Last über dem von der PV-Anlage gelieferten Strom liegt, speist die Netzversorgung zusätzlich Energie aus dem externen Netz in den DC-BUS ein (Bild 4).

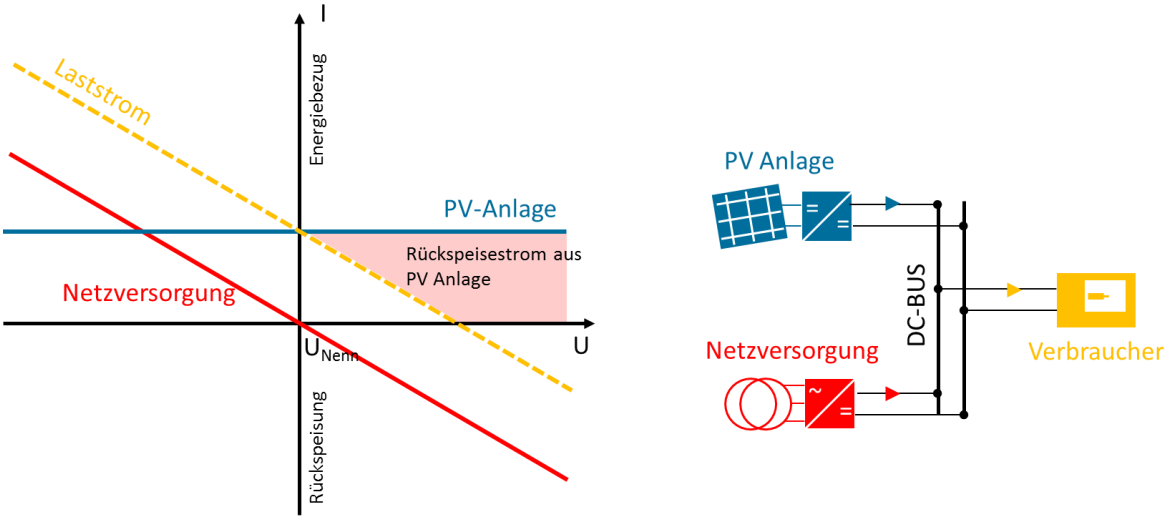

Bild 4: Einspeisestrom von PV Anlage und Netzversorgung in Abhängigkeit des Laststroms

Während die Regelung der DC-BUS Spannung in aktiven Producern und Prosumern in Echtzeit stattfindet, kann es sinnvoll sein, die Regelkurven in Abhängigkeit von äußeren Einflüssen wie bspw. Marktpreis oder Produktions- und Prozesssituation anzupassen, um eine wirtschaftlich günstigere Betriebsführung zu erreichen. Diese Anpassungen erfolgen in deutlich langsameren Intervallen zwischen wenigen Sekunden bis hin zu Tagen. Hierfür wird eine ergänzende, übergeordnete Kommunikationsstruktur benötigt. Dieser funktionale Bereich des Netzmanagements ist daher von dem Systemdienst der Lastflusssteuerung zu unterscheiden.
Zwar können Anlagen mit Hilfe analoger Kennlinien gesteuert werden, es bedarf jedoch entsprechend ergänzender, prozessbedingter Parameter um den wirtschaftlichen und sicheren Betrieb zu gewährleisten. Hier liegt die Schnittstelle zur Energieflexibilisierung von Anlagen, da hier ein entsprechend über das Spannungsniveau gesteuertes dezentrales Energie- und Produktionsmanagement möglich ist [10].
Das resultierende DC-Netz besteht aus aktiven Teilnehmern mit regelkennlinienbasierter Lastflusssteuerung und Anlagen in Form von Consumer- und Prosumerverbünden, die von der jeweiligen Anlagensteuerung mittels Energiemanagementsteuerungskennlinien betriebsoptimiert gesteuert werden (Bild 5).

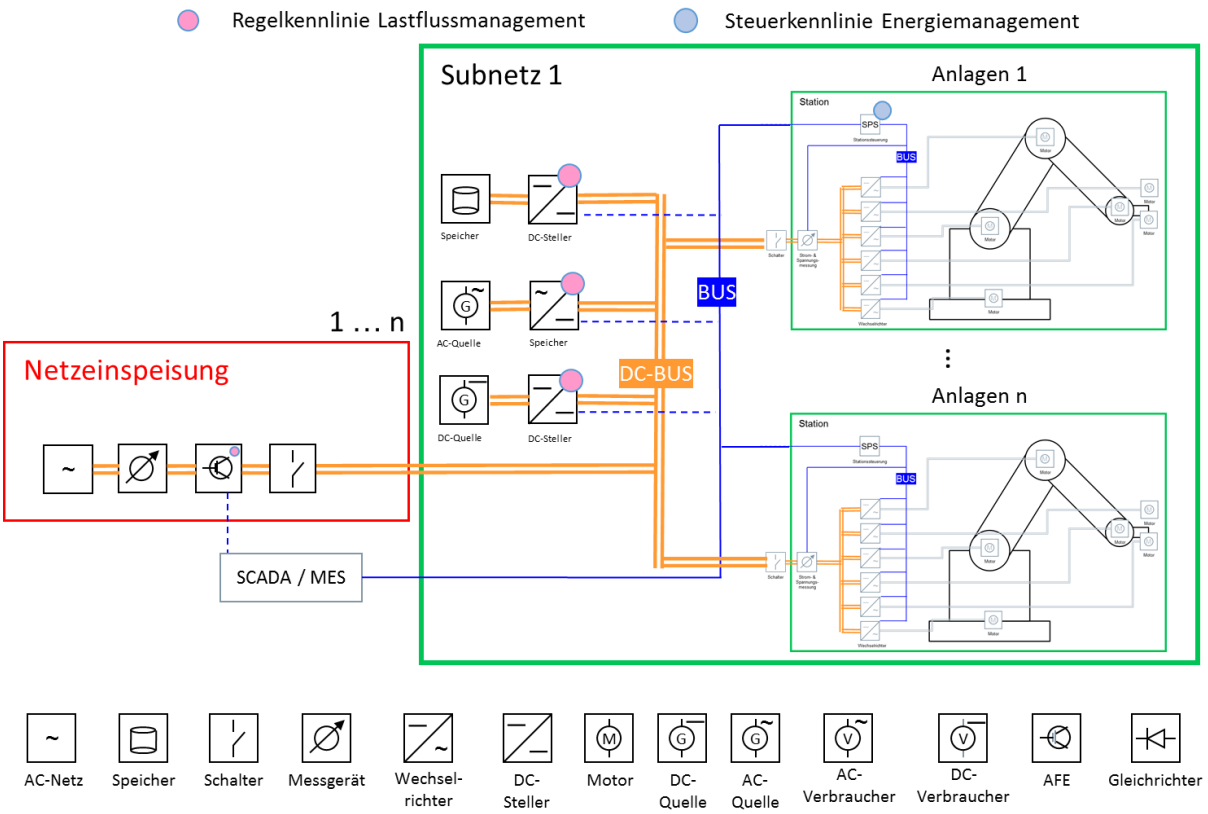

Abbildung 5: Dezentrale Lastflusssteuerung und Steuerungskennlinienbasiertes Netzmanagement von Anlagen

5. Simulative Bewertung

Zur simulativen Bewertung wird eine Produktionssimulation aufgebaut. Dabei wird sowohl das Produktionssystem als auch die Energieversorgung parallel simuliert. Anschließend wird ein reales Fertigungssystem in der Simulation abgebildet und untersucht.

5.1 Aufbau der Simulationsumgebung

Für die Simulation des Produktionssystems wird ein Produktionsmanagementsystem abgebildet, dass jedem Prozess Informationen über die Aufträge und die damit verbundene Start- und Pflichtendzeit jedes Auftrags bereitstellt. Darüber hinaus können die Prozesse sowie die Lagersysteme miteinander kommunizieren (Bild 6).

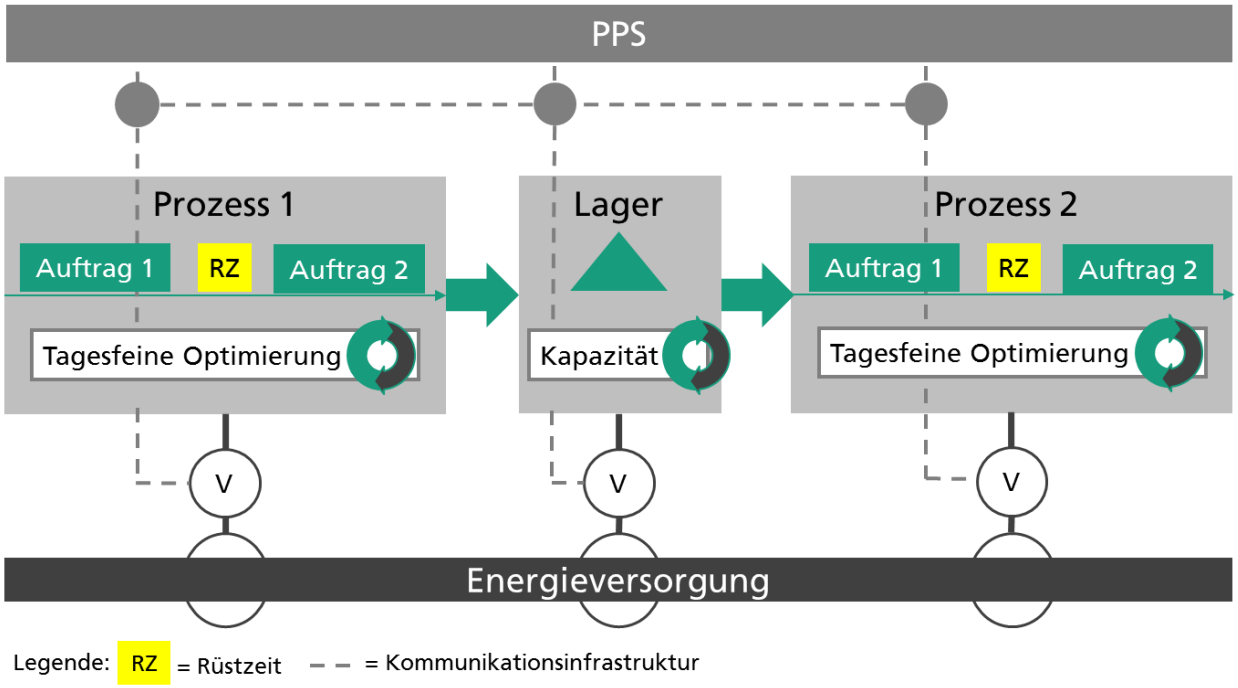

Bild 6: Modellstruktur des Produktionssystems

Die Energieversorgung wird als Gleichstromversorgungsnetz modelliert [7]. Alle Stromquellen werden als ideale Spannungsquelle mit ihrer internen Impedanz simuliert. In einem stabilen Netzbetrieb werden Angebot und Nachfrage in Abhängigkeit von der Lastimpedanz der Maschinen und den internen Impedanzen der Quellen ausgeglichen. Zusätzlich stellt der Spannungspegel innerhalb des DC-Busses die Verfügbarkeit von Energie innerhalb des Netzes dar. Je höher der Spannungspegel ist, desto mehr Energie steht zur Verfügung.

5.2 Fallstudie

Es wurde ein Kunststoffteilfertigungssystem mit zwei Spritzgießmaschinen und einer Klarlack-Lackiererei ausgewählt (Bild 7). Auf der einen Seite wurde in der Software Plant Simulation eine logistische Simulation der Produktionskette aufgebaut. Alle Daten wurden vor Ort aufgenommen und in das Modell importiert. Darüber hinaus wurde ein Produktionsplanungssystem programmiert. Das Modell ist somit in der Lage, logistische Produktionsdaten, z.B. Produktionsvolumen, Energieverbrauch auf Maschinenebene oder Lagerbestand abzubilden. Auf der anderen Seite wurde in der Software Matlab eine Simulation der Energieversorgung aufgebaut. Dabei wurden die Maschinen als aktive Consumer abgebildet. Ein Energiespeicher wurde als aktiver Prosumer und die Netzeinspeisung als aktiver Producer integriert.

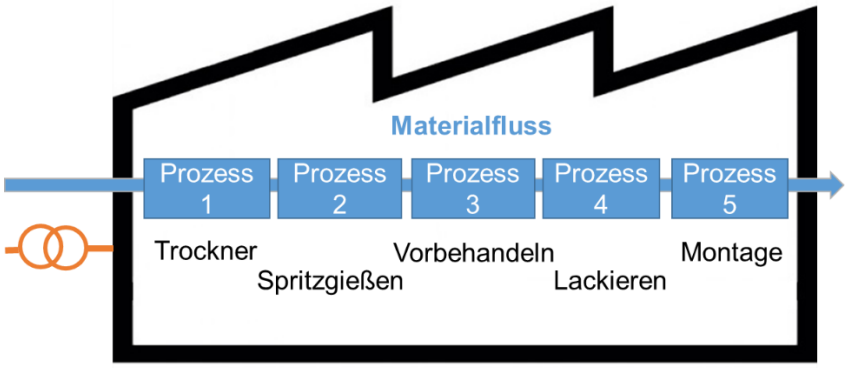

Bild 7: Produktionskette eines Kunststoffteilfertigungssystems

Unter Verwendung der Fallstudien spezifischen Verarbeitungszeit, Rüstzeit und Produktionsmengen wurde für jeden Prozess eine Energiemanagementsteuerkennlinie implementiert. Für den Energiespeicher sowie die Netzeinspeisung wurden Lastflussmanagementregelkennlinien implementiert. Über einen Zeitraum von zwei Wochen wurden Energiepreise aus dem deutschen Energiemarkt mit einem Intervall von 15 Minuten importiert. Auf Basis der dezentralen Einzelprozessoptimierung mit Hilfe der Energiemanagementsteuerkennlinie sind eine

Systemoptimierung und eine damit verbundene Energiekostensenkung in Abhängigkeit des Energiemarktpreises zu erwarten. Darüber hinaus ist auf Basis der dezentralen Lastflussoptimierung eine robuste und zuverlässige Energieversorgung zu erwarten. Insgesamt konnten im Untersuchungszeitraum die Energiekosten um 10% reduziert werden. Zudem konnte gezeigt werden, dass die Spannung am DC-Bus sich in einem Intervall von 620 Volt bis 660 Volt einpendelt und eine robuste Energieversorgung gewährleistet (Bild 8).

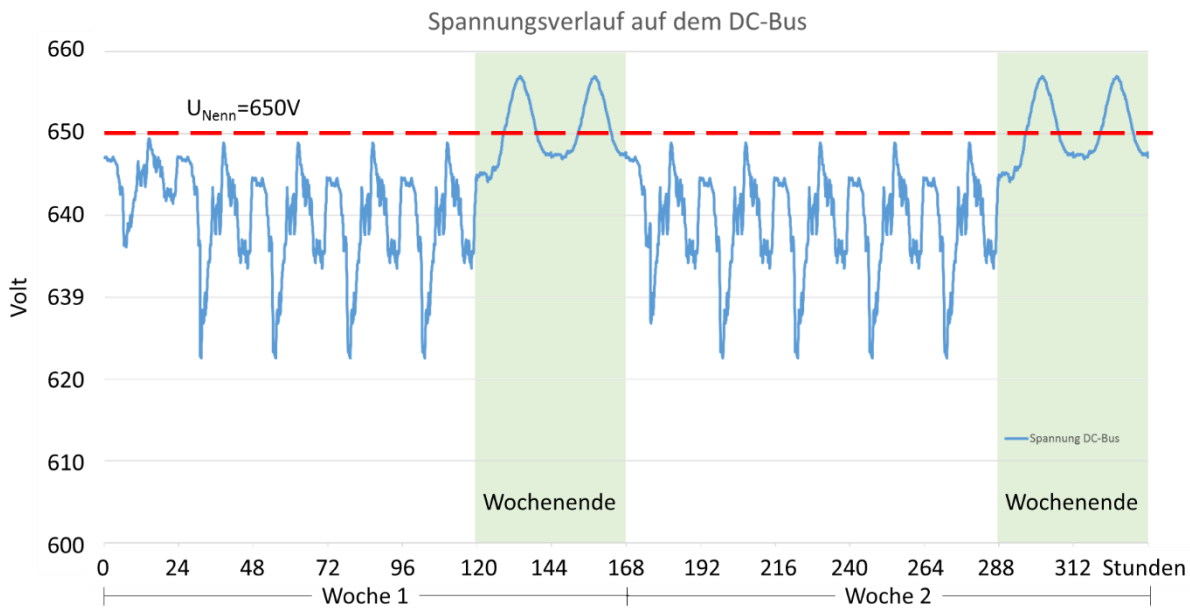

Bild 8: Spannungsverlauf auf dem DC-BUS mit aktiven Teilnehmern

6. Fazit und Ausblick

Die Ergebnisse der Simulation eines Kunststoffherstellers unterstützen die Annahme, dass die Energieflexibilität in Verbindung mit einer DC-Energieversorgung in der Produktion zu deutlichen Reduktionen der Energiekosten beitragen kann. Darüber hinaus bietet der Spannungsverlauf am DC-Bus eine Möglichkeit zur echtzeitfähigen Systemkommunikation, die die Grundlage einer robusten und einfach rekonfigurierbaren Systemarchitektur ist.

Weitere Untersuchungen hinsichtlich der Versorgungssicherheit, Rekonfigurierbarkeit und Systemrobustheit werden im weiteren Projektverlauf unternommen.

7. Literatur

[1] Nitsch, J.; Pregger, T.; Naegler, T.; Heide, D.; de Tena, D. L.; Trieb, F.; Trost, T.: Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global. Schlussbericht im Auftrag des BMU, bearbeitet von DLR (Stuttgart), Fraunhofer IWES (Kassel) und IfNE (Teltow), 2012. Verfügbar unter: http://www.fvee.de/fileadmin/publikationen/Politische_Papiere_anderer/12.03.29.BMU_Leitstudie2011/BMU_Leitstudie2011.pdf

[2] N.N: Agora Energiewende (Hrsg.): Die Energiewende im Stromsektor: Stand der Dinge 2015. Rückblick auf die wesentlichen Entwicklungen sowie Ausblick auf 2016. Verfügbar unter: https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2016/Jahresauswertung_2016/Agora_Jahresauswertung_2015_web.pdf

[3] N.N: Bundesnetzagentur (Hrsg.): Qualität der Stromversorgung 2014 höher als in den Vorjahren. Pressemitteilung Bundesnetzagentur. Bonn, 20. August 2015. Verfügbar unter: https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2015/150820_SAIDI_Strom.html

[4] Axel R.: Bedeutung der standortbezogenen Versorgungszuverlässigkeit elektrischer Energie für die Industrie. Fachdialog Spannungsschwankungen. Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft des Landes Baden-Württemberg. Stuttgart, 25.11.2015. Verfügbar unter: https://um.baden-wuerttemberg.de/de/energie/versorgungssicherheit/netzausbau/fachdialog-spannungsschwankungen/

[5] Borcherding, H.; Kuhlmann, T.: Energieeffiziente Gleichspannungsversorgung zur Versorgung von industriellen Produktionsanlagen. Studie des ZVEI, Frankfurt am Main, 2015.
[6] Kuhlmann, T.: Anforderungen und Chancen/Risiken der DC-Technologie. In: Gleichspannung in der Produktion: Die Zukunft einer robusten effizienten Architektur zur Energieversorgung, Stuttgarter Produktionsakademie, Stuttgart, 2017.
[7] N. N.: ABB-Glossar für technische Fachbegriffe: Netzmanagment. Internet: http://www.abb.de/cawp/abbzh250/9e38d9e4fe6dd31bc12575520045cdf6.aspx#N, Zuletzt geprüft am 31.05.2017
[8] Ott, L.; Han, Y.; Wunder, B.; Kaiser, J.; Fersterra, F.; Schulz, M.; Marz, M.: An advanced voltage droop control concept for grid-tied and autonomous DC microgrids. In: INTELEC 2015 - 2015 IEEE International Telecommunications Energy Conference. Osaka, Japan.
[9] Augustine, S.; Mishra, M.K.; Narasamma, N.L.: Proportional droop index algorithm for load sharing in DC microgrid. In: IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems, Mumbai, 2014.
[10] Weckmann, S.; Kuhlmann, T.; Sauer, A.: Decentral energy control in a flexible production to balance energy supply and demand. In: 24th CIRP Conference on Life Cycle Engineering. Kamakura, 2017