

Transformationsprozess von Produktionsmaschinen in einem industriellen Gleichstrommikronetz

Methode für Analyse, Entwurf und Umrüstung von Maschinen

D. Hölderle, J. Knapp, A. Sauer

Ein essenzieller Baustein der Energiewende ist die Steigerung der Energieeffizienz. Vor allem im industriellen Kontext gilt es, vorhandene Energiesparpotenziale zu heben. Gleichstrommikronetze (DC-MG) können dazu einen nennenswerten Beitrag leisten. Um diese Netzform in Fabriken zu etablieren, ist die Umrüstung von Maschinen und Anlagen, die überwiegend auf Drehstrom basieren, notwendig. Dieser Beitrag beschreibt eine Methode, die bei der Analyse, dem Planungsprozess und dem Umbau von Wechselstrommaschinen auf Gleichstromnetze systematisch unterstützen soll.

STICHWORTE

Energieeffizienz, Mechatronik, Werkzeugmaschinen

Methodology for analysis, design and retrofitting of machines operating in an industrial DC network

Increasing energy efficiency is an essential component of energy transition. In industry, it is particularly important to leverage existing energy-saving potential. To achieve this, DC microgrids can make a significant contribution. For establishing this network type in factories, it is necessary to convert machines and systems that are predominantly based on three-phase current. This paper describes a method to systematically support the analysis, planning process and conversion of AC machines to DC networks.

1 DC-Mikronetze und Umrüstung von Produktionsmaschinen

Die Forschung im Bereich der Gleichstrommikronetze zeigt erhebliches Potenzial zur Steigerung von Energie- und Ressourceneffizienz im Fabrikumfeld [1] und leistet weiterführend einen Beitrag zur Netzstabilität und -flexibilität [2] sowie zur Versorgungssicherheit [3].

Ein Faktor der Energieeffizienz ist die effiziente Integration dezentraler Energieerzeuger. Fabrikdächer werden zunehmend mit Photovoltaikanlagen (PV-Anlagen) ausgestattet, deren Spitzenleistungen oft im Bereich mehrerer hundert Kilowatt liegen. Diese Anlagen produzieren Gleichstrom, der mit Umrichtern vor dem Einspeisen in Wechselstrom gewandelt werden muss. Mit der Verwendung von Gleichstrommikronetzen (DC-MG) entfällt dieser Wandlungsschritt, wodurch die Wandlungsverluste um bis zu 8 % reduziert werden können [4].

Ein weiterer Faktor ist die Energierückgewinnung aus dynamischen Maschinen, wie etwa Robotern. Diese besitzen ein Reku-perationspotenzial, das aufgrund mangelnder Rückspeisefähigkeit der AC-Netzanbindung (AC: Wechselstrom) oft nicht genutzt werden kann und deshalb über Bremswiderstände in Abwärme umgewandelt wird. Durch die Anbindung an ein DC-Netz (DC: Gleichstrom) liegen die Einsparpotenziale zwischen 5 % und 20 % [5].

Um den Einzug von DC-Mikronetzen in Bestandsfabriken sicherzustellen, ist es notwendig, die Wirtschaftlichkeit der Umstellung von AC- auf DC-Netze im Blick zu behalten. Durch die Möglichkeit zur Umrüstung bestehender Maschinen und Ferti-

gungsanlagen von AC auf DC kann auf teure Neuanschaffungen verzichtet werden. Energieeffizienzpotenziale können durch das Umrüsten von Bestandsmaschinen somit auch im Brown Field wirtschaftlich gehoben werden [6]. Die Transformation einer AC-Maschine für die Anbindung an ein DC-Mikronetz wird im Weiteren exemplarisch an einer Spritzgussmaschine aufgezeigt.

2 Umrüstmethodik

Die Umrüstung der Spritzgussmaschine erfolgte im Transferzentrum Stuttgart des Forschungsprojekts „DC-Industrie2“. Der Umrüstvorgang lehnt sich an die in [7] beschriebene allgemeine Methodik zur Umrüstung von Produktionsmaschinen an und wird durch die hier beschriebene Bewertungsmethode ergänzt.

Die allgemeine Methodik ist in vier wesentliche Abschnitte unterteilt: Spezifikationsphase, Systemanalyse, Beschaffungsphase und Ergebnisphase. Diese Phasen werden in einzelne Handlungsschritte unterteilt, die im Ausführungsprozess seriell, parallel oder iterativ durchlaufen werden. Da zum aktuellen Zeitpunkt noch keine Normierung industrieller DC-Netze erfolgt ist und jedes DC-MG spezifische Merkmale aufweist, ist es nötig, genaue Zielvorgaben zu definieren. Diese bilden die Zwangsbedingungen des Umrüstprozesses, die zum einen vom DC-Mikronetz und zum anderen von der umzurüstenden Maschine vorgegeben werden.

Die Methodik wird allgemeingültig beschrieben und soll somit auf jede Produktionsmaschine anwendbar sein. Weiterführend wird im Speziellen für die Systemanalyse eine Methodik beschrieben, die bei der Bewertung einzelner Funktionen und Kom-

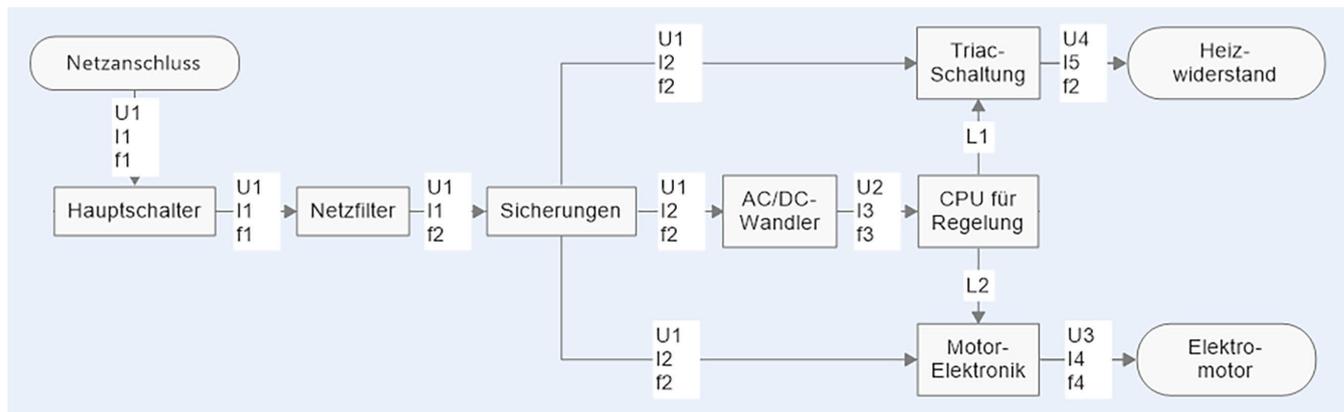


Bild 1. Bauteilanalyse einer Spritzgussmaschine mit Flussgrößen. Grafik: EEP Universität Stuttgart

ponenten der umzurüstenden Maschinen unterstützt und somit die Komplexität der Transformation reduziert.

- Ausgangszustand der Spritzgussmaschine:
Gegenstand des Umbaus ist eine handelsübliche horizontale Mikro-Spritzgussmaschine vom Typ „Babyplast Christmann“. Der Arbeitsteil der Maschine verfügt über ein Hydrauliksystem, das zur Positionierung der Gussformen und für den Kunststofftransport zuständig ist. Über Heizwiderstände wird das Kunststoffgranulat aufgeschmolzen. Die Ansteuerung der Aktoren erfolgt über eine digitale Steuerung, die über die Hauptplatine mit Optokopplerschaltungen galvanisch getrennt erfolgt. Die Spritzgussmaschine verfügt über einen dreiphasigen Drehstromanschluss mit einem 16A-Stecker.
- Angestrebter Zielzustand der Spritzgussmaschine:
Da die Umrüstung möglichst minimalinvasiv erfolgen soll, ist idealerweise nur der elektrische Leistungsteil der Maschine zu ersetzen. Im Konkreten müssen die Energieversorgungen der Heizwiderstände und des Hydraulikpumpenmotors umgerüstet werden. Um die Aktoren für Gleichstrom zu befähigen ist unter Umständen eine Anpassung der elektrischen Leistungsglieder erforderlich. Dadurch können Änderungen an den Reglern erforderlich werden.

Des Weiteren ist die elektrische Sicherheit nach der Umrüstung neu zu bewerten.

2.1 Spezifikationsphase

In der Spezifikationsphase werden alle Informationen bezüglich der zu integrierenden Maschine, also der Spritzgussmaschine und des Gleichstrommikronetzes, gesammelt und daraus Zwangsbedingungen für den Transformationsprozess abgeleitet. Methodisch werden die Informationen in zwei Gruppen unterteilt: in die netzseitigen und in die maschinenseitigen Spezifikationen.

2.1.1 Netzseitige Spezifikationen

Als Grundlage der netzseitigen Spezifikation gilt das Systemkonzept des Forschungsprojekts „DC-Industrie2“ [3] sowie die Systemdefinitionen nach [8]. Auf diesen basiert das DC-Transferzentrum des Instituts für Energieeffizienz in der Produktion (EEP) der Universität Stuttgart, in dem die Spritzgussmaschine steht.

- Spannungsniveau: Das im Systemkonzept beschriebene Netz besteht aus den spannungsführenden Leitern DC-Plus und DC-

Minus, welche in einem Spannungsband zwischen 650 V und 750 V liegen. Während des Betriebs darf die Spannung innerhalb dieses Spannungsbands variieren. Die Maximalspannung im Netz kann bis zu 800 V betragen.

- Leistung von Netz und Maschine: Das DC-Mikronetz wird über einen AIC (Active Infeed Converter) mit einer Maximalleistung von 62 kW aus dem AC-Netz gespeist und liegt damit deutlich über der Aufnahmeleistung der Spritzgussmaschine, welche bei 3 kW liegt.
- Schutzorgane und Netzteilnehmer: Die Spritzgussmaschine wird über einen separaten DC-Abzweig, welcher als Sicherheitsorgan dient und das ungeladene Netz beim Einschalten langsam vorlädt, an das Netz angebunden. Dadurch wird der Schutz von Netzinfrastruktur und weiteren Netzteilnehmern im Überlast- und Fehlerfall sichergestellt.

2.1.2 Maschinenseitige Spezifikationen

Bei den maschinenseitigen Spezifikationen ist darauf zu achten, dass beim Umbau nicht nur der Erhalt der Maschinenfunktionen, sondern auch der Schutz von Mensch, Maschine und weiteren Netzteilnehmern nicht vernachlässigt wird. Somit ist auf Kurzschlusschutz, Strom- und Spannungstrennung sowie die Vermeidung von Strom- und Spannungsrippel zu achten [6].

2.2 Systemanalysephase

Von der Umrüstung ist vor allem der elektrische Leistungsteil der Maschine betroffen, weshalb die Analyse von dieser Seite aus erfolgt. Im Leistungsteil sind als Hauptverbraucher ein Dreiphasenmotor, fünf Heizelemente und ein Spannungswandler für die Bereitstellung der Steuerspannung eingebunden. Die Funktionen dieser Bauelemente gilt es, im Transformationsprozess zu erhalten.

Der Elektromotor treibt die Hydraulikpumpe der Maschine an und ist bauartbedingt schwierig zu ersetzen. Der Erhalt wird deshalb angestrebt. Gleiches gilt für die Heizelemente.

Um sich ein generelles Bild über die Notwendigkeit der Systemkomponenten machen zu können, ist eine strukturierte Vorgehensweise bei der Systembetrachtung empfehlenswert.

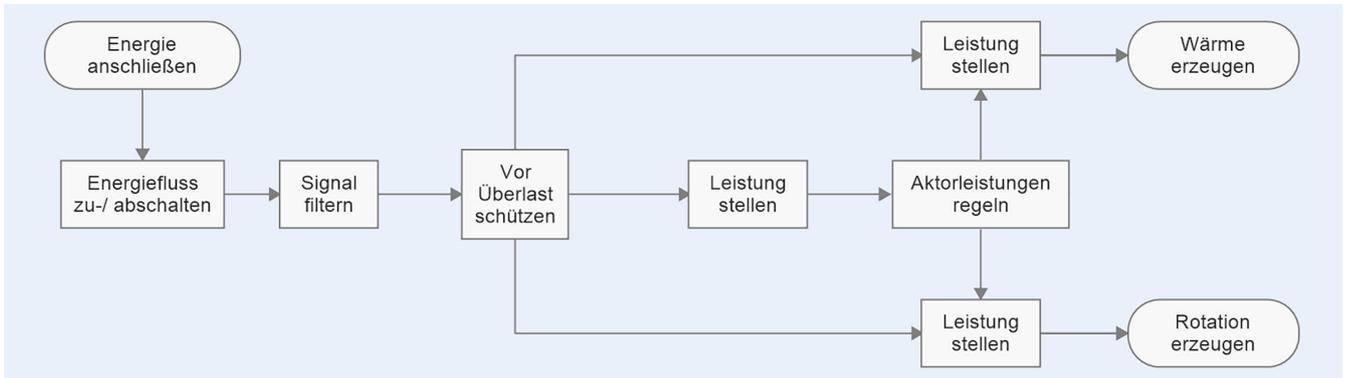


Bild 2. Funktionenmodell des Leistungsteils einer Spritzgussmaschine. Grafik: EEP Universität Stuttgart

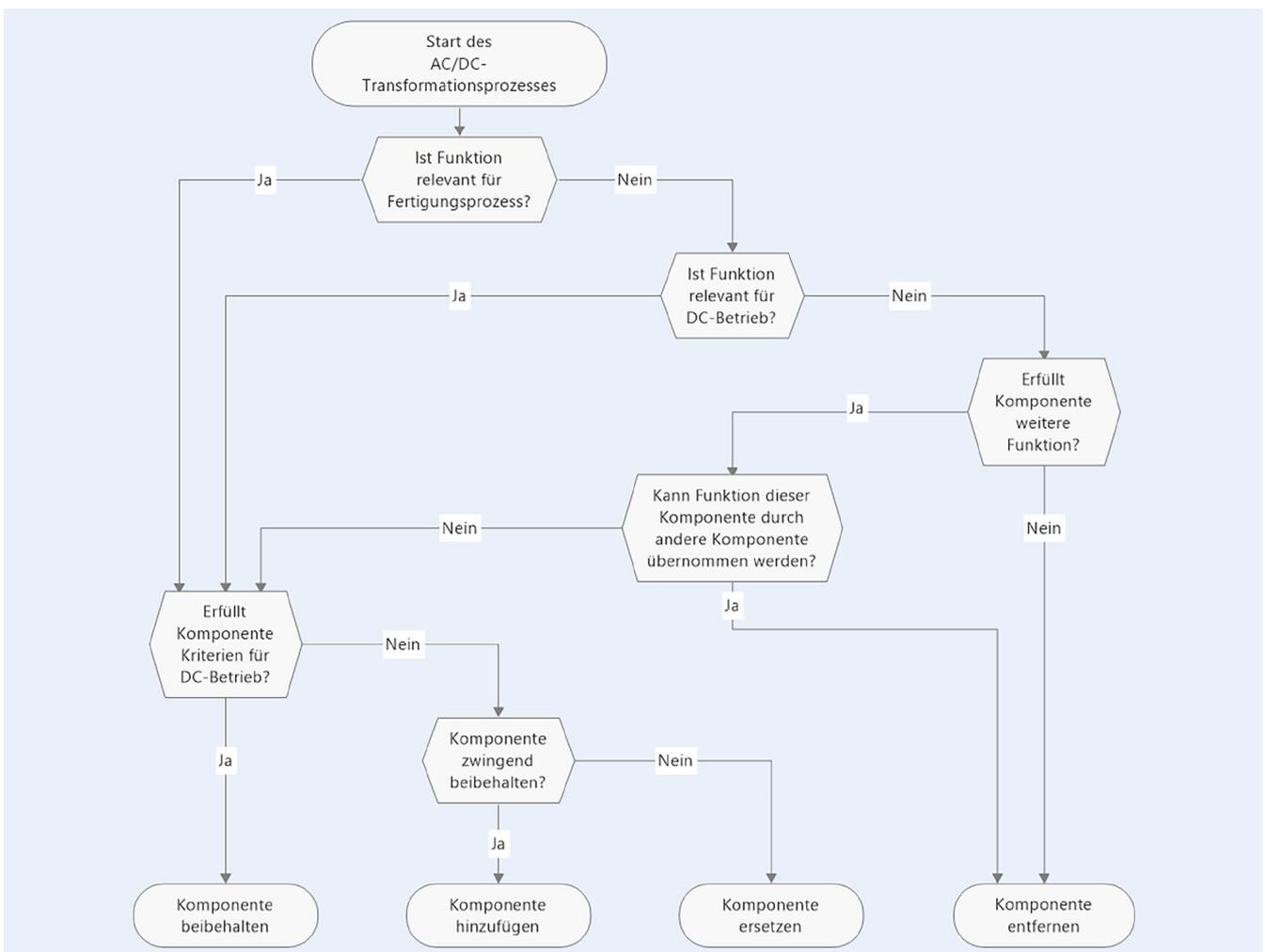


Bild 3. Entscheidungsbaum zur Bewertung aller Funktionen für den AC-DC-Transformationsprozess. Grafik: EEP Universität Stuttgart

Schritt 1: Analyse auf Bauteil beziehungsweise Funktionskomponentenebene

Im ersten Schritt erfolgt die Betrachtung des zu transformierenden Leistungsteils auf Basis der Bauteile, wie in **Bild 1** dargestellt.

Die Blöcke der Grafik stehen für Funktionskomponenten oder Bauteile und können innerhalb ihrer Systemgrenzen beliebig verfeinert werden. Die Pfeile stellen die Flussgrößen dar, wobei

mehrere Flussgrößen zu einem Pfeil zusammengefasst sind. Flussgrößen sind Spannung U_i , Strom I_i , Frequenz f_i und Logiksignal L_i . Der Index soll verdeutlichen, dass durch das Bauteil die Flussgröße verändert wird.

Tabelle. Ergebnistabelle Bewertung der Funktionskomponenten.

Bauteil	Funktion	Entscheidung			
		beibehalten	ersetzen	hinzufügen	entfernen
Netzstecker	Energie anschließen		x		
Hauptschalter	Energie einschalten		x		
Netzfilter	Störfrequenzen filtern				x
Schmelzsicherungen	Vor Überlast schützen		x		
AC-DC-Wandler	Leistung stellen		x		
Regler-CPU	Leistung regeln	x			
DC-DC-Wandler	Leistung stellen			x	
Triac-Schaltung	Leistung stellen		x		
Heizwiderstand	Wärme erzeugen	x			
Motorelektronik	Leistung stellen	x			
Elektromotor	Rotation erzeugen	x			

Schritt 2: Transformation des Bauteilmodells in ein Funktionenmodell

Um bewerten zu können, ob die Notwendigkeit aller Bauteile nach der Umrüstung noch gegeben ist, wird das Bauteilmodell in ein Funktionenmodell, wie in **Bild 2**, überführt.

Dieses Modell unterstützt bei der Bewertung der Relevanz von Funktionen und Komponenten. Die getrennte Betrachtung anhand der beiden Modelle ist von Vorteil, um die Notwendigkeit von Komponenten klar herausarbeiten zu können, die unter Umständen mehrere Funktionen bereitstellen. Andererseits kann eine Funktion auch durch mehrere Komponenten realisiert werden.

Schritt 3: Bewertung von Funktionen und Funktionskomponenten

Es wurde ein Algorithmus erarbeitet, der dabei helfen soll, die Relevanz aller Funktionen und Komponenten im Zuge des Umrüstprozesses von AC auf DC zu bewerten. Die Vorgehensweise wird in **Bild 3** beschrieben.

Der Entscheidungsbaum wird für jede ermittelte Funktion aus Bild 2 durchlaufen. Bei jeder Entscheidung wird entweder eine Funktion oder die zugehörige Komponente (Bauteil) bewertet. Die Bewertung der Tauglichkeit der Komponenten im Gleichstromnetz erfolgt anhand der in den Bauteildatenblättern definierten technischen Spezifikationen.

Nachdem der Entscheidungsbaum mit allen ermittelten Funktionen durchlaufen wurde, liegt für jede zugehörige Komponente die Entscheidung vor, ob die Komponente entfernt, ersetzt oder beibehalten wird beziehungsweise ob für die ordnungsgemäße Funktion eine weitere Komponente hinzugefügt werden muss. Stellt sich heraus, dass Funktionen oder Komponenten wegfallen oder hinzukommen, so werden diese in den Modellen angepasst.

Nachdem der Algorithmus auf alle Blöcke des Funktionenmodells angewendet wurde, wird mit dem aktualisierten Modell von vorne begonnen. Das Modell für das DC-System ist vollständig, wenn alle Entscheidungen eines Durchlaufs das Ergebnis „Komponente beibehalten“ ergeben. Die Entscheidungen können wie in

der **Tabelle** zusammengefasst werden. Mithilfe des Prozesses konnte festgestellt werden, dass das AC-Netzfilter überflüssig geworden ist. Des Weiteren wurde ein zusätzlicher DC-DC-Wandler notwendig.

2.3 Ergebnisphase

In der vorigen Phase wurden die Komponenten der Spritzgussmaschine auf ihre Notwendigkeit und Tauglichkeit für den DC-Betrieb bewertet. Anhand der Ergebnisse werden weiterführend die Schaltpläne, Stücklisten und Zeichnungen der Maschine überarbeitet.

Aufgrund noch fehlender Standardisierung von DC-Netzen kann die Beschaffung bestimmter Komponenten schwierig sein. Die Analyse der Spritzgussmaschine ergab die Notwendigkeit eines zusätzlichen DC-DC-Wandlers, der die Eingangsspannung, welche zwischen 650 V und 750 V liegt, auf eine für die Heizwiderstände verträgliche Spannung von 230 V DC reduziert. In dieser Leistungsklasse sind Komponenten mit diesen Parametern unüblich, weshalb die Sonderanfertigung eines geeigneten DC-DC-Wandlers erforderlich wurde.

3 Fazit und Ausblick

Gleichstrommikronetze können einen wichtigen Beitrag zur Steigerung der Energieeffizienz in der Industrie leisten. Zur wirtschaftlichen Umstellung elektrischer Fabriknetze von Wechselstrom auf die Gleichstromtechnologie bietet die Befähigung von Bestandsmaschinen für DC-Netze einen ökonomisch wie technologisch sinnvollen Ansatz.

In diesem Beitrag wurde eine Methode zur Umrüstung von Bestandsmaschinen von Wechselstrom auf Gleichstrom anhand des Praxisbeispiels einer Spritzgussmaschine vorgestellt. Eine allgemeine Herangehensweise im Umrüstprozess wurde von *Knapp* [7] bereits beschrieben. *Knapp* unterteilte die Methode in die drei Schritte Spezifikation-, Systemanalyse- und Ergebnisphase.

Daran anknüpfend wurde in diesem Beitrag eine Methode zur Analyse der elektrischen Maschinenkomponenten und deren

Funktionen erläutert, die eine Verfeinerung der Systemanalyse darstellt. Der verfeinerte Ansatz wurde in drei Schritten präsentiert. Im ersten Schritt fand eine Analyse auf Bauteil- beziehungsweise Funktionskomponentenebene statt. Als Resultat daraus lag ein Bauteilmodell vor. Im zweiten Schritt wurde die Transformation des Bauteilmodells in ein Funktionenmodell beschrieben. Im finalen Schritt erfolgte die Bewertung von Funktionen und Funktionskomponenten einer Spritzgussmaschine anhand ihrer Gleichstromtauglichkeit.

Zur Bewertung der Funktionen und Komponenten für den Betrieb unter Gleichstrom wurde ein Algorithmus in Form eines Entscheidungsbaumes präsentiert. Der Entscheidungsbaum wurde für alle relevanten Bauteile und die damit verbundene Funktion durchlaufen und die Ergebnisse in einer Tabelle präsentiert.

Auf den Ergebnissen aufbauend kann die Feinplanung eines Umrüstprozesses erfolgen, die unter anderem das Überarbeiten elektrischer Schaltpläne umfasst. Die Ergebnistabelle unterstützt bei der Umgestaltung des elektrischen Schaltplans und gibt Aufschluss darüber, ob eine Komponente beibehalten, entfernt, ersetzt oder gar Komponenten hinzugefügt werden müssen.

Über diesen Beitrag hinaus gilt es, die Allgemeingültigkeit des Algorithmus anhand weiterer Praxisbeispiele zu validieren und gegebenenfalls zu verfeinern. Eine Analyse der Umrüstkosten kann dabei ebenfalls in Betracht gezogen werden. Des Weiteren sind das Ergebnis des Umrüstprozesses und die Effizienz der Spritzgussmaschine vor und nach dem Umbau zu bewerten.

FÖRDERHINWEIS

Die vorgestellten Ergebnisse wurden im Rahmen des Projektes „DC-INDUSTRIE2“ (Förderkennzeichen: 03EI6002N) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWK) gefördert.

Literatur

- [1] Kuhlmann, T.; Zeiser, R.: Wie effizient sind gleichspannungsversorgte Maschinen? Methode zur Identifikation des Energieeffizienzpotenzials durch Umrüstung von Wechselspannung (AC) auf Gleichspannung (DC). Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 117 (2022) 12, S. 862–866, doi.org/10.1515/zwf-2022–1179
- [2] Stammberger, H.; Austermann, J.; Borchering, H.: Systemkonzept für DC-INDUSTRIE2. Stand: 2020. Internet: dc-industrie.zvei.org/publikationen/systemkonzept-fuer-dc-industrie2. Zugriff am 08.02.2023
- [3] Laribi, R.; Schaab, D.: Nutzenpotenziale von DC-Smart-Grids in der Industrie. Energieeffizienz, Fabrikplanung. Düsseldorf: VDI Fachmedien 2019
- [4] Fregosi, D.; Ravula, S.; Brhlik, D.: A comparative study of DC and AC microgrids in commercial buildings across different climates and operating profiles. 2015 IEEE First International Conference on DC Microgrids, Atlanta, GA, USA, 2015, pp. 159–164, doi: 10.1109/ICDCM.2015.7152031
- [5] Rankis, I.; Meike, D.; Senfelds, A.: Utilization of Regeneration Energy in Industrial Robots System. Power and Electrical Engineering. Power and Electrical Engineering 31 (2013), pp. 95–100
- [6] Kuhlmann, T.; Schaab, D. A.; Sauer, A.: Wie die Gleichstromfabrik real wird – Effizienzsteigerung bei der Energieversorgung in sieben Schritten. Vorgehensmodell zur Transformation der heutigen AC-Netz Versorgung zum industriellen DC-Smart- Grid. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 117 (2022) 1–2, S. 35–40, doi.org/10.1515/zwf-2022–1003
- [7] Knapp, J.; Righetti, P. de; Schaab, D.: Methodik zur Umrüstung von Produktionsmaschinen. wt Werkstattstechnik online 112 (2022) 03, S. 178–181. Internet: www.werkstattstechnik.de. Düsseldorf: VDI Fachmedien
- [8] Sauer, A. (Hrsg.): Die Gleichstromfabrik. Energieeffizient. Robust. Zukunftsweisend. München: Carl Hanser Verlag 2020



Dietmar Hölderle , M. Sc.

Foto: Fraunhofer IPA

Jonas Knapp, M. Sc.

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. **Alexander Sauer**

Institut für Energieeffizienz in der Produktion (EEP)

Universität Stuttgart

Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart

Tel. +49 711 / 970-1492

dietmar.hoelderle@eep.uni-stuttgart.de

www.eep.uni-stuttgart.de

LIZENZ



Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)