Bei diesem Beitrag handelt es sich um einen wissenschaftlich begutachteten und freigegebenen Fachaufsatz („reviewed paper“).

doi.org/10.37544/1436-4980-2023-03-58

Messung und Auswertung in einer Produktionsanlage

Netzmanagement eines Gleichspannungsmikronetzes

J. Knapp, I. Bianchini, S. Riethmüller, D. Hölderle, A. Sauer

Das Forschungsprojekt „DC-Industrie2“ beschäftigt sich mit der Umsetzung der Gleichspannungstechnologie im industriellen Sektor. Dabei sind Versuchsanlagen auf Laborebene sowie im industriellen Umfeld entstanden. Der Beitrag präsentiert und bewertet die Ergebnisse von Messungen verschiedener Szenarien. Im ersten Szenario wird das DC-Mikronetz ohne und mit Batteriespeicher getestet, jeweils mit kaltarbeitenden Lasten. Im zweiten Szenario werden die Messungen mit und ohne Batteriespeicher wiederholt, jedoch mit warmarbeitenden Lasten. Der Einsatz eines Batteriespeichers mit Regelkennlinie reduziert die Spannungsschwankungen im Gleichspannungsmikronetz.

STICHWÖRTER

Energieeffizienz, Messen/Steuern/Regeln

Grid management of a DC microgrid

The research project „DC-Industrie2“ deals with the implementation of DC voltage technology for the industrial sector, resulting in test installations at laboratory level and in the industrial environment. The paper presents and evaluates the results of measurements of different scenarios. In the first scenario, the DC microgrid is tested with and without battery storage, both with cold-working loads. In the second scenario, the measurements are repeated with and without battery storage, but with hot-working loads. The use of battery storage with droop control reduces the voltage fluctuations in the DC microgrid.

1 Einleitung

Das Interesse an Gleichspannungsmikronetzen (DC-Mikronetzen) im Industriesektor ist in der letzten Dekade seit 2022 gewachsen [1]. Ein Grund ist der Anstieg an erneuerbaren Energien, speziell der Anstieg von Photovoltaikanlagen (PV-Anlagen). In Wechselstromnetzen (AC-Netzen) wird in der Regel die PV-Anlage mittels Gleichspannungswandler und Wechselrichter an das elektrische Netz angeschlossen. Im DC-Mikronetz hingegen entfällt der Wechselrichter, da der Gleichspannungswandler direkt an das DC-Netz angeschlossen werden kann. Somit reduzieren sich die Wandlungsverluste und der Wirkungsgrad der PV-Anlage steigt [2].

Auch bei Batteriespeichern können mit dem Einsatz eines DC-Netzes der Wechselrichter gespart und die Umwandlungsverluste um bis zu 7 % reduziert werden [3]. Darüber hinaus entfallen die Herausforderungen der Frequenzsynchronisation, der Blindleistungsregelung und des Einflusses des Skin-Effekts auf Leitungen [4]. Ein weiterer Vorteil des DC-Mikronetzes ist die einfache Nutzung des Rekuperationspotenzials industrieller Anlagen. Jeder Antrieb, welcher Bremsvorgänge durchführt, hat das Potenzial die Bremsenergie rückzuspeisen, anstatt diese über einen Bremswiderstand in Wärme zu wandeln [5]. Bei CNC-Maschinen führt die Kombination aus reduzierten Wandlungsverlusten und Bremsenergierückgewinnung zu einer Steigerung der Gesamtenergieeffizienz um 6,2 % [3]. Für Industrieroboter wird ein Rekuperationspotenzial von 15 % während des Betriebs geschätzt [5]. Ein DC-Mikronetz bietet nicht nur Vorteile beim Thema Energieeffizienz, sondern auch bei der Ressourceneffizienz. In AC-Netzen werden Leitungen typischerweise mit den Außenleitern L1, L2 und L3 verwendet, wogegen bei DC-Mikronetzen nur DC+ und DC- benötigt werden. Somit reduziert sich die Aderzahl und damit der Kupferbedarf der Leitungen [3].

Ein weiterer markanter Unterschied zu herkömmlichen AC-Netzen ist das nominelle Spannungsband des DC-Mikronetzes von 620 – 750 V. In diesem Spannungsband wird das DC-Mikronetz mittels Primärregelung geregelt. Die dafür eingesetzte Kennlinienregelung, auch Statikregelung genannt, bildet das Verhalten von Synchrongeneratoren in Wechselstromnetzen nach [6]. Die Kennlinienregelung erfordert keine Kommunikation zwischen den Geräten und ist daher robust gegenüber Kommunikationsfehlern [7]. Je nach Ausgestaltung der Regelkennlinie können bestimmte Funktionen, wie etwa Spitzenlastreduktion durch ein elektrisches Speichersystem, realisiert werden.

Im Rahmen des Forschungsprojekts „DC-Industrie2“ wurden verschiedene DC-versorgte Versuchsanlagen und industrielle Anwendungsfälle erfolgreich getestet [8]. Einer dieser industriellen Anwendungsfälle ist ein industrielles DC-Mikronetz bei der Firma Homag GmbH, das zwei Holzbearbeitungsmaschinen, Roboter sowie einen Batteriespeicher umfasst. In diesem Beitrag werden Messergebnisse von verschiedenen Messszenarien aus dem realen DC-Mikronetz bei der Homag GmbH vorgestellt.

Zuerst wird das DC-Mikronetz und die darin enthaltenen elektrischen Geräte beschrieben. Anschließend wird das Rege-

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2023-03-58 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

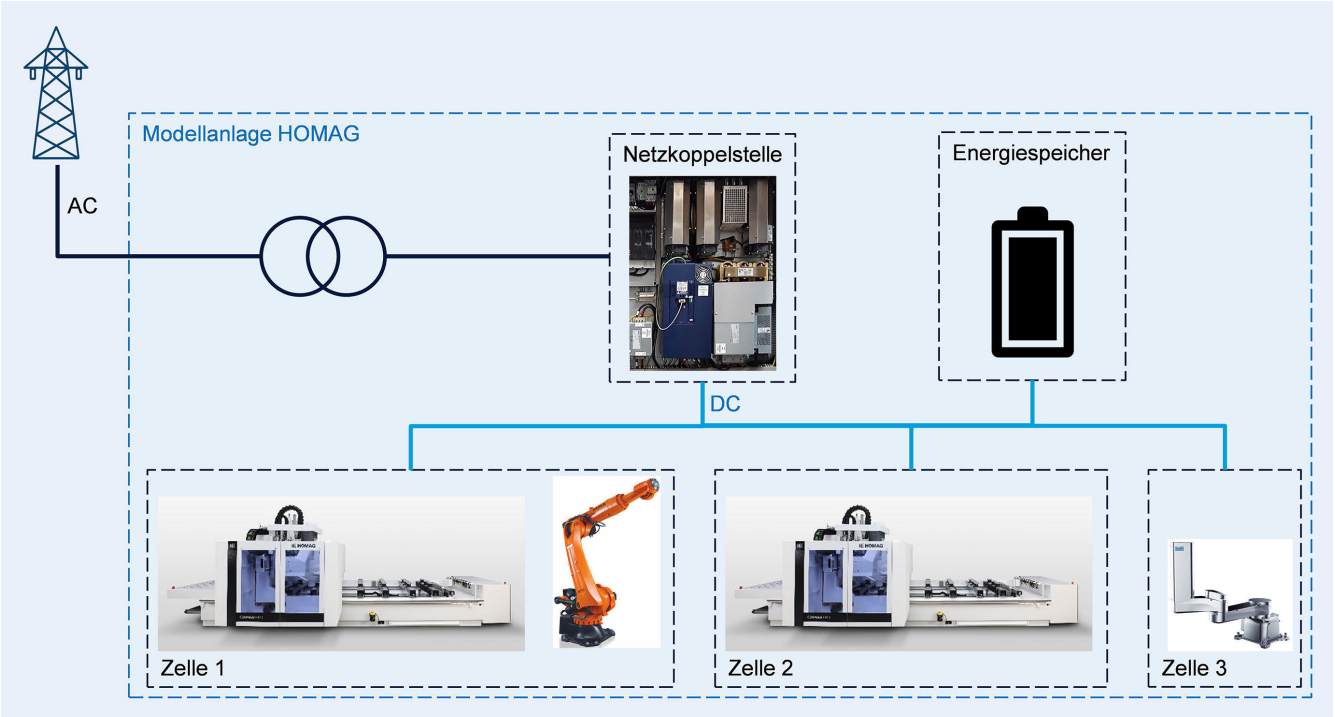

Bild 1. Strukturelles Schema des elektrischen DC (Gleichspannungs)-Mikronetzes im Homag-Werk. *Grafik: Fraunhofer IPA*

lungsdesign und die Auslegung der Primärregelung für das reale DC-Mikronetz erläutert und die darin eingebauten Funktionen erklärt. Zuletzt werden die Messergebnisse der Messszenarien beschrieben, analysiert und ausgewertet. Im ersten Szenario wird das DC-Mikronetz ohne und mit Batteriespeicher getestet, jeweils mit kaltarbeitenden Lasten. Im zweiten Szenario werden die Messungen mit und ohne Batteriespeicher wiederholt, jedoch mit warmarbeitenden Lasten. Eine Last wird als warmarbeitend definiert, sobald diese 30 Minuten aktiv betrieben wurde.

2 Systembeschreibung

Der typische Aufbau eines Gleichspannungsnetzes ist in **Bild 1** am Beispiel des Homag DC-Mikronetzes dargestellt.

Alle Geräte sind über einen DC-Bus miteinander gekoppelt, welcher den Strom zwischen den Geräten verteilt. Eine aktive Netzkoppelstelle speist das DC-Bussystem. Die Netzkoppelstelle ist der Verbindungspunkt zwischen dem AC- und dem DC-Netz und wandelt die Spannung auf das entsprechende Niveau [9]. Zusätzlich ist eine Lithium-Ionen-Batterie integriert, die folgend als Energiespeichersystem (ESS) bezeichnet wird. Die Lasten des Gleichspannungsnetzes sind auf drei Zellen aufgeteilt. Darin befinden sich insgesamt zwei Roboter und zwei Holzbearbeitungsmaschinen. In der ersten Zelle befindet sich eine Homag Holzbearbeitungsmaschine und ein Roboter. In der zweiten Zelle wird eine weitere Holzbearbeitungsmaschine verwendet, welche der in der ersten Zelle ähnelt, jedoch ohne Roboter. Die dritte und kleinste Zelle besteht aus einem einzelnen Roboter.

Für die folgenden Kapitel ist es notwendig, die aktiven Geräte zu definieren und diese von den passiven zu unterscheiden. Jedes aktive Gerät erhält eine vordefinierte Regelkennlinie und passt seine Versorgung oder seinen Verbrauch entsprechend dem Zustand des DC-Busses an. Daher ist das aktive Gerät an der Regelung des DC-Mikronetzes beteiligt. Das System in diesem Beitrag enthält zwei aktive Geräte, die aktive Netzkoppelstelle und den Batteriespeicher, weshalb zwei Regelkennlinien benötigt werden. Die passiven Geräte des dargestellten DC-Mikronetzes sind die darin enthaltenen Lasten.

3 Regelungsdesign

Die primäre Regelung des DC-Mikronetzes, die Kennlinienregelung, ist eine dezentrale Regelung ohne Kommunikation zwischen Geräten [10]. Vorteile bietet eine Kennlinienregelung sowohl beim Verzicht von Kommunikation, als auch in der Robustheit im Normalbetrieb sowie im Störfall [1]. Das übergeordnete Regelungsziel, die Sicherstellung der Stabilität, wird über das Regelungsdesign realisiert. Dazu werden im ersten Schritt die notwendigen Geräteparameter ermittelt. Im zweiten Schritt folgt die Erstellung der Regelkennlinien unter Berücksichtigung von vordefinierten Funktionen. Diese Funktionen sind beispielsweise eine konstante Einspeisung im Normalbetrieb, eine Spitzenlastkappung oder eine unterbrechungsfreie Stromversorgung. Im letzten Schritt werden die Regelkennlinien mithilfe des Nyquist-Kriteriums hinsichtlich der Kleinsignalstabilität geprüft. Ist die daraus resultierende Phasenreserve groß genug, werden die Regelkennlinien in der realen Anlage getestet.

Die im zweiten Abschnitt genannten aktiven Teilnehmer im Homag DC-Mikronetz sind der Batteriespeicher und die aktive Netzkoppelstelle. Die Lasten in den drei Zellen sollen keine speziellen Funktionen erfüllen und benötigen daher keine Regelkennlinie. Die für die aktiven Teilnehmer erstellten Regelkennlinien sind in **Bild 2** dargestellt.

An der Abszisse kann die Spannung abgelesen werden, wobei drei Spannungsbereiche unterschieden werden. In jedem Spannungsbereich hat nur eine Regelkennlinie eine positive Steigung, die anderen Kennlinien hingegen stagnieren. Das führt dazu, dass

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2023-03-58 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

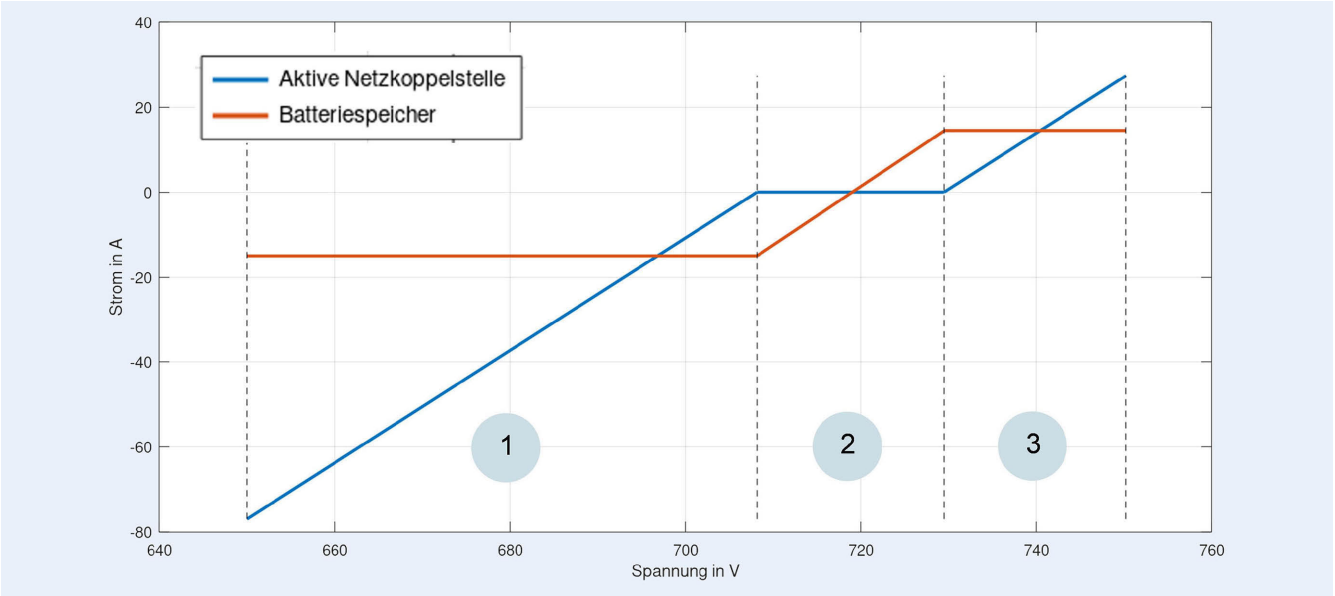

Bild 2. Regelkennlinie der aktiven Netzkoppelstelle und des Batteriespeichers im Gleichspannungsmikronetz bei der Homag GmbH. *Grafik: Fraunhofer IPA*

immer nur ein Gerät regelt und keine Mehrgrößenregelung notwendig wird.

Im ersten Spannungsbereich ist zu erkennen, dass die Netzkoppelstelle aktiv und der Speicher passiv ist. Gleichzeitig führen beide Geräte einen negativen Strom, was bedeutet, dass Strom von der Batterie und vom AC-Netz in das DC-Mikronetz fließt. Im zweiten Spannungsbereich stagniert nun die Netzkoppelstelle auf dem Wert Null und speist weder ein noch aus. Der Speicher dagegen schwankt zwischen einem negativen und einem positiven Strom und erlaubt so die Lastspitzenkappung. Kleine Änderungen der Spannung werden durch den Batteriespeicher abgefangen. Sollte die Residuallast des DC-Mikronetzes bekannt sein, wird die Regelkennlinie der Netzkoppelstelle auf den entsprechenden Strom verschoben. Im dritten Spannungsbereich mit den höchsten Spannungswerten steigt die Kennlinie der Netzkoppelstelle an und erreicht den positiven Strombereich. Sollte mehr Energie im DC-Mikronetz vorhanden sein als benötigt wird, kann diese Energie in das AC-Netz rückgespeist werden.

Anhand dieser zwei Regelkennlinien mit drei Spannungsbereichen werden die Funktionen der Lastspitzenkappung (Bereich 2) und der Rückspeisung (Bereich 3) überschüssiger Energie realisiert. Aus Sicht des Betreibers sollte der typische Betriebspunkt im zweiten Spannungsbereich liegen, um die Lastspitzenkappung bestmöglich auszunutzen.

4 Ergebnisse

Für den in Kapitel 2 beschriebenen industriellen Anwendungsfall wurden verschiedene Szenarien definiert, um die entworfenen Regelkennlinien zu testen. Im ersten Szenario wurde das DC-Mikronetz ohne und mit Batteriespeicher getestet, jeweils mit kaltarbeitenden Lasten (Kaltarbeitsmessungen: M1 und M3). Im zweiten Szenario wurden die Messungen mit und ohne Batteriespeicher wiederholt, jedoch mit warmarbeitenden Lasten (Warmarbeitsmessungen: M2 und M4). Eine Last wird als warmarbeitend definiert, sobald diese 30 Minuten aktiv betrieben wurde. **Bild 3** zeigt die Ergebnisse der Warmarbeitsmessungen an der Netzkoppelstelle (M2, M4). Verglichen wurden die Spannung, der Strom und die Leistung.

Es ist zu erkennen, dass bei Einsatz des Speichersystems eine geringere Leistung in das DC-Mikronetz eingespeist wurde. Das Energiespeichersystem lieferte auf dieser Spannungsebene einen konstanten Strom an das DC-Mikronetz und übernahm einen Teil der Last. Dies wurde nur mit dezentraler Regelung erreicht, und es ist keine Kommunikation notwendig.

Zusätzlich sind in **Bild 4** Histogramme der Häufigkeit von Strom- und Spannungswerten dargestellt.

Die Medianwerte der Spannungs- und Stromwerten wurden als vertikale Linien dargestellt (schwarz: Kaltarbeitsmessungen, grau: Warmarbeitsmessungen). Hier ist die Verschiebung des Stroms zu niedrigeren Werten und der Spannung zu höheren Werten zu erkennen. Bei Vergleich der Leistung von Warm- und Kaltarbeitsmessungen zeigt sich, dass sich die Messungen an kalt und warm arbeitenden Maschinen unter Einsatz des Speichersystems nicht unterscheiden. Darüber hinaus ähnelt sich sowohl die Spannungsverteilung als auch die Stromverteilung. Diese Beobachtung resultiert aus der Eigenschaft der Lastspitzenkappung des Speichers. Es sind nur geringfügig niedrigere Stromwerte im Falle der Warmarbeit zu beobachten, insgesamt benötigte das warme System weniger Energie als das kalte. Ohne Energiespeicher ist der Unterschied größer, da die Lastspitzenkappung entfällt. Die Stromstärke unterscheidet sich im Durchschnitt um 2 A zwischen den Warm- und den Kaltbetriebsmessungen. Die Spannungswerte wiesen eine ähnliche durchschnittliche Differenz auf, aber die Häufigkeit der Spannungswerte unterscheidet sich deutlich. Dies war beim Strom nicht der Fall. Dessen Häufigkeit kann in beiden Szenarien als ähnlich eingestuft werden.

Ähnliche Ergebnisse waren für den Wirkungsgrad zu beobachten. Der Wirkungsgrad stieg immer im Fall von Warmarbeitsmessungen. Der Unterschied ist aber nur relevant, wenn kein Speichersystem eingesetzt wurde. In diesem Fall verbrauchte das industrielle DC-Mikronetz 8 % weniger Energie als im Fall mit kalt arbeitenden Maschinen. In den Histogrammen der Spannung ist eine Normalverteilung zwischen 690 V und 710 V zu erkennen. Daraus lässt sich ableiten, dass die durch die kalt arbeitenden

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2023-03-58 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

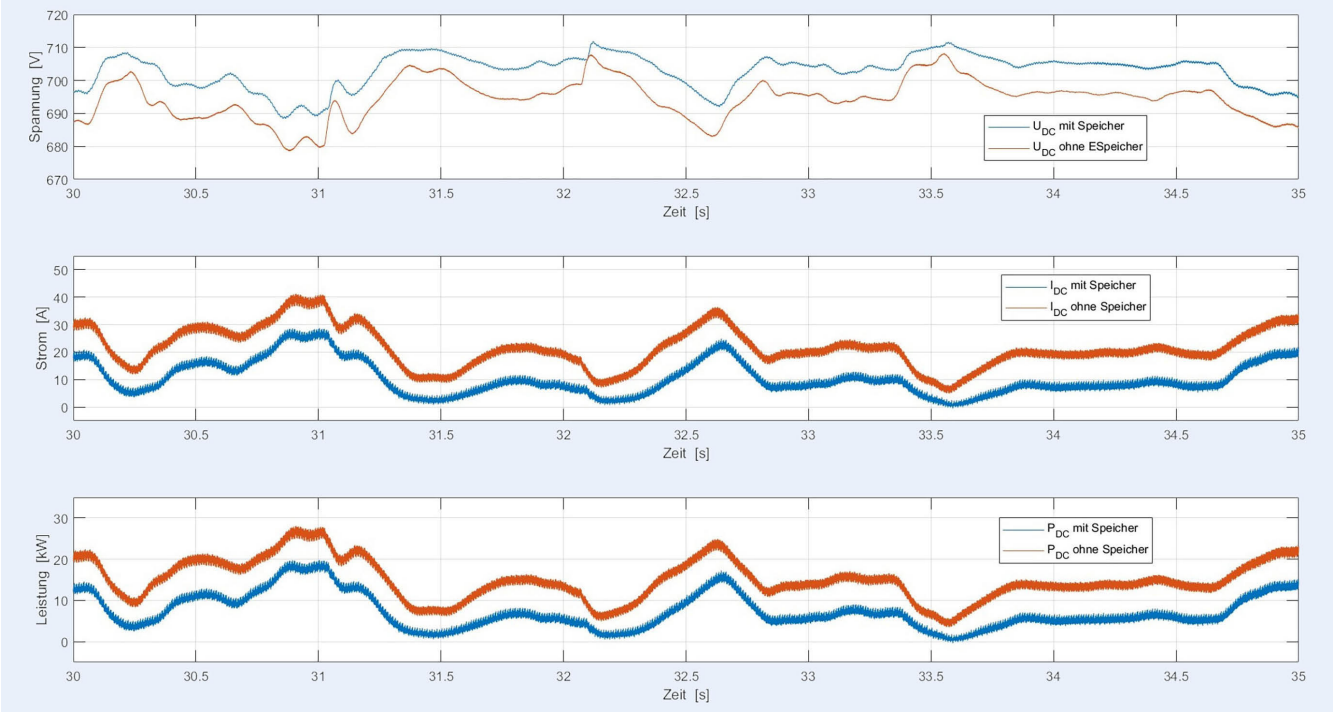

Bild 3. Ergebnisse der Warmarbeitsmessungen an der Netzkoppelstelle M2 und M4. Spannungsmessung oben, Strommessung Mitte und Leistungsmessung unten. *Grafik: Fraunhofer IPA*

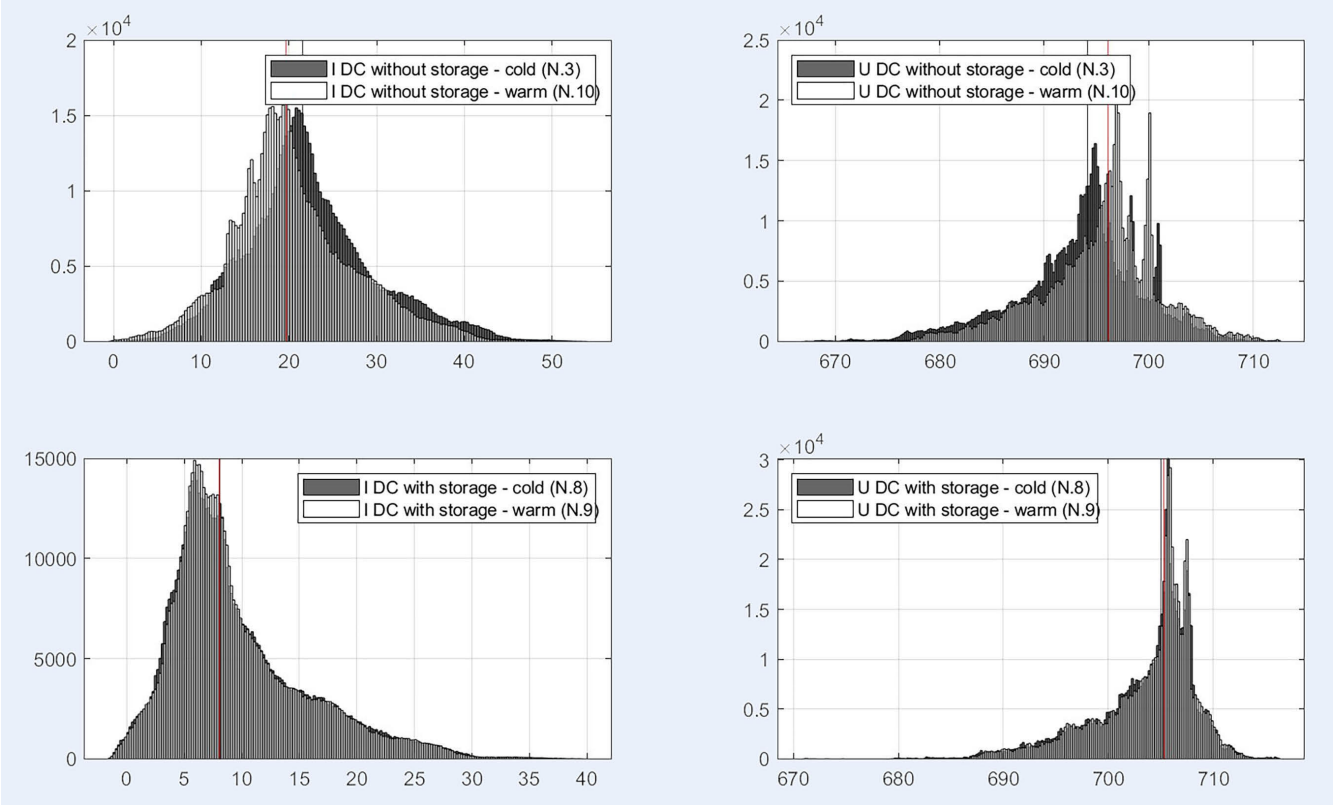

Bild 4. Häufigkeit der an der Netzkoppelstelle gemessenen Spannungs- und Stromwerte in Histogrammen für den Vergleich von Kalt- und Warmarbeitsmessungen. *Grafik: Fraunhofer IPA*

Maschinen verursachten Ineffizienzen durch das Energiespeichersystem teilweise kompensiert wurden. Anstatt einer Reduktion des Energieverbrauchs um 8,3 % bei warm arbeitenden Maschinen ohne Speichersystem (Vergleich M1-M2), wurde der Energieverbrauch bei Einsatz des Speichersystems nur um 0,3 % reduziert (Vergleich M3-M4).

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2023-03-58 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

5 Fazit und Ausblick

Diese Arbeit stellt die Messergebnisse aus dem realen DC-Mikronetz der Homag GmbH vor. Im DC-Mikronetz integriert waren drei Zellen an Lasten, eine aktive Netzkoppelstelle und ein Energiespeicher. Für dieses DC-Mikronetz wurden Regelkennlinien entworfen, um Funktionen wie die Lastspitzenkappung und Rückspeisung zu realisieren.

Als Messdaten standen Ströme und Spannungen für verschiedene Szenarien zur Verfügung. Im ersten Szenario wurde das DC-Mikronetz ohne und mit Batteriespeicher getestet, jeweils mit kaltarbeitenden Lasten. Im zweiten Szenario wurden die Messungen mit und ohne Batteriespeicher wiederholt, jedoch mit warmarbeitenden Lasten.

Die Ergebnisse zeigen eindeutig, dass Unterschiede zwischen warm- und kaltarbeitenden Lasten davon abhängen, ob ein Speicher verbaut ist. In den Messungen ohne Batteriespeicher sind die Unterschiede in der Stromverteilung von warm- zu kaltarbeitenden Lasten deutlich zu erkennen. Auch der Spannungsunterschied ist sichtbar über eine Verschiebung der Normalverteilung. Werden hingegen die Messungen mit Batteriespeicher betrachtet, so verschwinden die Unterschiede fast vollständig. Der Grund dafür liegt in der Lastspitzenkappung des Speichers, welche Spannungsschwankungen dämpft. Darüber hinaus steigt die Spannung durch Einsatz des Speichers. Dies liegt zum einen an der Nutzung des Speichers als Energiequelle, zum anderen an der Auslegung der Regelkennlinie. Darüber hinaus lässt sich zeigen, dass das warme System weniger Energie benötigt als das kalte System.

Im nächsten Schritt dieser Arbeit soll ein Quellen- und Energiemanagement an einer realen Anlage getestet und deren Wechselwirkungen auf das Regelungssystem betrachtet werden. Dazu müssen Messungen durchgeführt und mit Simulationen verglichen werden.

FÖRDERHINWEIS

Die vorgestellten Ergebnisse werden im Rahmen des Projektes „DC-Industrie2“ (Förderkennzeichen: 03EI6002L, 03EI6002N und 03EI6002D) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gefördert.

Literatur

[1] Ashok Kumar, A.; Amutha Prabha, N.: A comprehensive review of DC microgrid in market segments and control technique. Heliyon 8 (2022), 11, e11694

[2] Lu, X.; Guerrero, J. M.; Sun, K. et al.: An Improved Droop Control Method for DC Microgrids Based on Low Bandwidth Communication With DC Bus Voltage Restoration and Enhanced Current Sharing Accuracy. IEEE Transactions on Power Electronics 29 (2014) 4, pp. 1800–1812

[3] Kuhlmann, T.; Bianchini, I.; Sauer, A.: Resource and energy efficiency assessment of an industrial DC Smart Grid. Procedia CIRP 90 (2020), pp. 672–676

[4] Liu, Q.; Tao, Y.; Liu, X. et al.: Voltage unbalance and harmonics compensation for islanded microgrid inverters. IET Power Electronics 7 (2014) 5, pp. 1055–1063

[5] Meike, D.: Increasing Energy Efficiency of Robotized Production Systems in Automobile Manufacturing. PhD Thesis, Riga Technical University, 2013

[6] Meng, L.; Dragicevic, T.; Vasquez, J. C. et al.: Tertiary and Secondary Control Levels for Efficiency Optimization and System Damping in Droop Controlled DC–DC Converters. IEEE Transactions on Smart Grid 6 (2015) 6,pp. 2615–2626

[7] Shuai, Z.; Fang, J.; Ning, F. et al.: Hierarchical structure and bus voltage control of DC microgrid. Renewable and Sustainable Energy Reviews 82 (2018) 3, pp. 3670–3682

[8] ZVEI e.V.: „DC-INDUSTRIE“ – Energiewende trifft Industrie 4.0. Stand: 2022. Internet: dc-industrie.zvei.org. Zugriff am 01.03.2023

[9] ZVEI & consortium DC-INDUSTRIE2: System concept DC-INDUSTRIE2. Stand: 2022. Internet: dc-industrie.zvei.org/en/publications/system-concept-for-dc-industrie2. Zugriff am 01.03.2023

[10] Bianchini, I.; Knapp; Jonas et al.: Source Management In DC-Microgrids: An Industrial Application. 4th Conference on Production Systems and Logistics (CPSL 2023), 2023, [submitted]

Jonas Knapp, M.Sc.
Foto: Fraunhofer IPA

Dietmar Hölderle, M.Sc.

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

Universität Stuttgart, Institut für Energieeffizienz in der Produktion (EEP)
Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart
Tel. +49 711 / 970-1829
jonas.knapp@eep.uni-stuttgart.de
www.eep.uni-stuttgart.de

Isabella Bianchini, M.Sc.

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

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA
Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart

Simon Riethmüller, M.Sc.

Homag GmbH
Homagstr. 3-5, 72296 Schopfloch
Tel. +49 7443 / 13-3744

LIZENZ

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

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2023-03-58 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY