

Gleichstrom für die nachhaltige Fabrik





Gleichstrom für die nachhaltige Fabrik

Herausgeber:

Forschungsprojekt DC-INDUSTRIE

Förderkennzeichen 03ET7558A-N / 03EI6002A-Q

c/o ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik-
und Elektronikindustrie e.V.

Lyoner Straße 9

60528 Frankfurt am Main

Verantwortlich:

Gunther Koschnick

Telefon: +49 69 6302-377

E-Mail: automation@zvei.org

Redaktion: Autoren des ZVEI Arbeitskreis Kommunikation DC-INDUSTRIE:
Prof. Dr. Holger Borchering (TH OWL), Erik Fosselmann (Danfoss GmbH),
Dr. Timm Kuhlmann (Fraunhofer IPA), Dr. Hartwig Stammberger
(Eaton Industries GmbH)

Oktober 2020

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt.

Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes
ist ohne Zustimmung des Herausgebers unzulässig.

Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzung,
Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in
elektronischen Systemen.



Unter Mitarbeit von:

ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik-
und Elektronikindustrie e.V.

Fachverband Automation

Lyoner Straße 9

60528 Frankfurt am Main

Telefon: +49 69 6302-0

E-Mail: automation@zvei.org

www.zvei.org

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Nachdem es in unserem täglichen Leben immer mehr Geräte mit Gleichstromversorgung gibt (Mobiltelefon, LED, Fotovoltaik ...), ist der Übergang von Wechselstrom zu Gleichstrom nun auch auf Fabrikebene in vollem Gange und Gleichstromfabriken werden bald die neue Normalität sein.

1 Warum Gleichstrom?



Die Energiewende ist ein notwendiger Baustein der nachhaltigen Transformation der Gesellschaft. Im ökologischen Fokus steht ein Ressourcenverbrauch, der die natürliche Regenerationsfähigkeit der Erde nicht überschreitet. In Bezug auf die elektrische Energie kann das nur durch Effizienzsteigerung und die Nutzung CO₂-freier, regenerativer Energiequellen gelingen. Parallel muss sich die Produktion hin zu einer digitalen, vernetzten und individualisierten Produktion wandeln. Mehr Elektronik und sensible Produktionsprozesse erfordern ein Höchstmaß an Stromversorgungsqualität. Diesen neuen Herausforderungen wird das 130 Jahre alte Stromnetz nicht mehr gerecht. Um diese Ziele zu erreichen ist ein Wandel im industriellen Stromnetz notwendig.

Dieses Positionspapier richtet sich an Interessierte aus Industrie, Forschung und Politik. Es soll ihnen helfen, das herstellerunabhängige Gleichstromnetz (DC-Netz) als vielversprechende Lösung für die anstehenden Probleme und Herausforderungen der industriellen Energieversorgung kennenzulernen.

Das bringt Gleichstrom!

Gemeinsam haben über 40 Partner in den Projekten DC-INDUSTRIE und DC-INDUSTRIE 2, die seit 2016 vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie gefördert werden, Grundlagen für eine Gleichstrominfrastruktur in der Industrie erarbeitet und dabei folgende Ergebnisse erzielt:

1. Anschlussleistung senken

Die Anschlussleistung einer Schweißzelle mit Robotern im Automobilbau konnte von 450 kW auf 50 kW gesenkt werden. Dieses war durch die einfache Integration schneller Energiespeicher möglich.

2. Energieeffizienz steigern

Reduzierung der Wandlungsstellen AC-DC/DC-AC und der damit einhergehenden Verluste sowie die Nutzung der Bremsenergie von bewegten Massen führte je nach Prozessdynamik zu Energieeinsparungen um 6 bis 10 Prozent.

3. Standardisierung ist in vollem Gange

Die breite Industriebeteiligung und der Transfer der Erkenntnisse aus dem Forschungsprojekt DC-INDUSTRIE in die nationalen und internationalen Normungsgremien sichern den nachhaltigen technologischen Erfolg des Gleichstromnetzes.

4. Robuste, störungsfreie Energieversorgung

Ein dezentrales Netzmanagement mit den grundlegenden Funktionen, aber ohne zusätzliche Kommunikationsinfrastruktur, die einfache Integration von Speichern sowie ein einzelner Anschluss an das öffentliche AC-Netz sorgen für eine sichere Stromversorgung.

5. Gleichstromnetze sind sicher

Das DC-Netz ist genauso sicher für den Menschen wie das heutige AC-Netz. Schutz-einrichtungen sorgen für Sicherheit von Personen und Anlagen im Betrieb und bei Fehlern.

6. Das Gleichstromnetz ist ein intelligentes Netz

Vordefinierte Strom-Spannungs-Kennlinien in den Geräten sorgen für den sofortigen Ausgleich von Leistungsbedarf und Leistungsangebot. Ein übergeordnetes Energiemanagementsystem für die wirtschaftliche und die energetische Optimierung des Gleichstromnetzes kann ganz einfach integriert werden.

7. Einfache Integration erneuerbarer Energien

Da Anlagen für solare Energieerzeugung Gleichstrom liefern, benötigt man lediglich einen Gleichstromwandler statt des wesentlich aufwendigeren Wechselrichters. Dies spart nicht nur Kosten, auch die Dynamik und der Wirkungsgrad sind höher.

8. Netzdienlich

Das Gleichstromnetz kann das AC-Versorgungsnetz unterstützen. Beispielsweise können Speicher, die am Gleichstromnetz angeschlossen sind, Energie aus dem Versorgungsnetz aufnehmen oder dort einspeisen. Damit werden Schwankungen zwischen Energieangebot und Energiebedarf ausgeglichen.

9. Kleiner, leichter, günstiger

Die für energieeffiziente Antriebe notwendigen Umrichter werden einfacher, kleiner und kostengünstiger. Viele Komponenten, die bei Wechselstrom benötigt werden, entfallen bei Gleichstrom. Bei Umrichtern lassen sich bis zu 25 Prozent Volumen einsparen. Ähnliches gilt für andere Elektronikgeräte, die an das Gleichstromnetz angeschlossen sind.

Gleichstromversorgung funktioniert. In vier unterschiedlichen praxisnahen Versuchsanlagen wurde ein DC-Netz installiert. Die Anlagen arbeiteten störungsfrei – bei reduziertem Energiebedarf.

2 Wie hilft ein Gleichstromnetz?

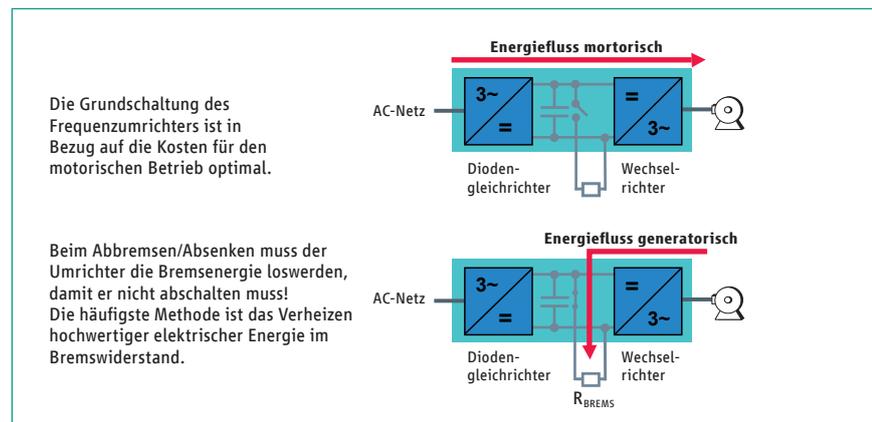
Wo kommen wir her?

Initiiert wurde das Projekt DC-INDUSTRIE in erster Linie vom ZVEI-Fachbereich Elektrische Antriebe. Die Gründe werden im Folgenden erläutert.

In der Industrie entfallen 70 Prozent des Stromverbrauchs auf Elektromotoren. Damit sind diese der mit Abstand größte Verbraucher elektrischer Energie. Jede Reduzierung der Leistungsaufnahme dieser Antriebe durch Wirkungsgradsteigerungen bedeutet auch eine entsprechende Reduzierung der CO₂-Emissionen. Ab dem Jahr 2021 müssen alle in der EU verkauften Drehstrommotoren mit einer Leistung von 0,75 bis 375 kW die Anforderungen der Energieeffizienzklasse IE3 erfüllen. Die Effizienzklassen werden auf Basis der Nenndrehzahl und des Nenndrehmoments eines Elektromotors definiert, d. h. für einen Betriebspunkt, der meistens nicht praxisrelevant ist. Damit steigen die Kosten und der Ressourcenverbrauch bei der Herstellung von Elektromotoren, aber die erwartete Reduktion des Energieverbrauchs wird nicht erreicht.

Ein bewährter Ansatz zum Erreichen einer viel höheren Energieeffizienz sind drehzahlveränderliche Antriebe. Die Energieeffizienz lässt sich auch mit Umrichtern am Drehstromnetz (AC-AC-Umrichter) steigern, allerdings haben die etablierten Umrichter einige negative Eigenschaften. Sie behindern eine noch bessere Energieeffizienz und sie belasten das AC-Netz durch die Verzerrung der sinusförmigen Spannung. Bild 1 erläutert den Aufbau und die Nachteile der AC-AC-Umrichter.

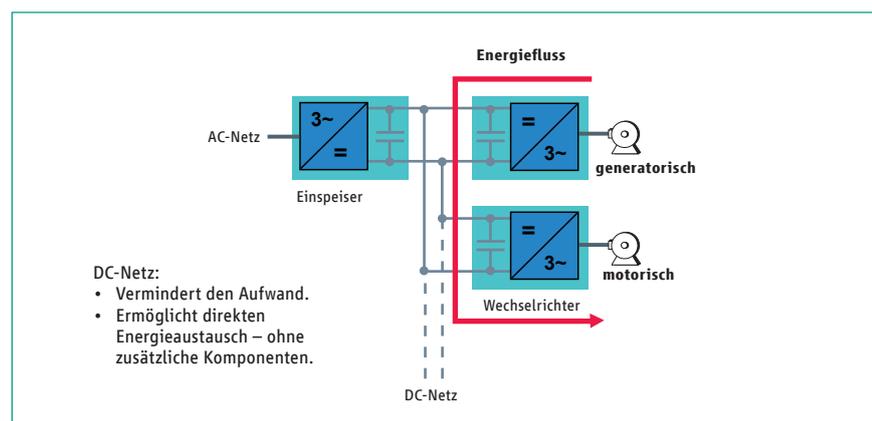
Bild 1: Aktueller Stand bei AC-AC-Umrichtern



Quelle: TH OWL

Da die Frequenzumrichter ohnehin intern einen Gleichstromkreis nutzen, ist es sinnvoll diesen direkt mit dem DC-Netz zu verbinden, um so unnötige Umwandlungsverluste zu vermeiden, wie in Bild 2 gezeigt. Damit kann viel Bremsenergie unmittelbar durch andere Verbraucher genutzt werden.

Bild 2: Energieaustausch über das DC-Netz



Quelle: TH OWL

Darum haben gerade die Hersteller der elektrischen Antriebstechnik als Erste die Initiative ergriffen und das Projekt DC-INDUSTRIE initiiert. Durch einen für DC-Netze offenen Systemansatz, herstellerunabhängig und breit einsetzbar im industriellen Bereich, lassen sich noch viele weitere Vorteile erreichen, die das große Interesse einer Vielzahl von Firmen am DC-Netz erklären. Diese Vorteile werden in den weiteren Abschnitten erläutert.

Kostenvorteil durch Systemansatz

Es ist davon auszugehen, dass sich durch den Systemansatz für das Gleichstromnetz eine deutliche Kostenreduzierung bei der Anschaffung und im laufenden Betrieb erzielen lässt. So fallen zum Beispiel bei Frequenzumrichtern Komponenten weg, die in einem Gleichstromnetz nicht mehr benötigt werden. Des Weiteren ist mit einer Kostenreduzierung bei der Verkabelung zu rechnen. Auch bei der Einspeiseeinheit besteht Einsparungspotenzial, da in einem DC-Netz die installierte Leistung reduziert werden kann. An einigen Stellen des DC-Netzes, z. B. bei Schutzeinrichtungen, sind allerdings auch höhere Kosten zu erwarten. Diese werden jedoch durch zusätzliche Funktionalitäten mehr als ausgeglichen.

Ein Beispiel: Die Leistungselektronik in den Geräten des Gleichstromnetzes steuert den Stromfluss effizient und erfasst über die inneren Sensoren dabei gleichzeitig den Zustand des Netzes. Das Stromnetz in der Fabrik wird digital und unterstützt so, abgesehen von der nachhaltigen Transformation der Fabrik, auch deren Digitalisierung. Die in Bezug auf die Energieflüsse gewonnene Transparenz erschließt weitere Potenziale, die über das Einsparen von Energie weit hinausgehen. Beispielsweise kann man anhand abnormaler Stromverläufe einen Verschleiß an Maschinen frühzeitig erkennen und sich so vor ungeplanten Maschinenausfällen schützen.

Eigenständigkeit im Mikrogrid

Das Gleichstromnetz in der Fabrik ist ein eigenständiges Stromnetz (Mikrogrid), welches mit dem öffentlichen Versorgungsnetz verbunden ist. Die Symbiose aus Gleichstrom und Eigenständigkeit ermöglicht eine einfache, kostengünstige Integration von Speichern und lokalen Stromerzeugungsanlagen in die Stromversorgung der Fabrik. Kommt es zu Störungen im Versorgungsnetz, beispielsweise Kurzzeitunterbrechungen, so entkoppelt sich das Mikrogrid vom öffentlichen Netz und versorgt die Produktion weiterhin mit Energie. Reicht die lokale Energie nicht für einen dauerhaften Produktionsbetrieb bei längeren Unterbrechungen aus, so wird zumindest ein gezieltes und kontrolliertes Anhalten der Produktionsprozesse ermöglicht. Ausfallzeiten durch langes Initialisieren der Prozesse bei Energiewiederkehr und Ausschuss durch plötzliches, unkontrolliertes Ausschalten von Anlagen wird vermieden.

Optimierung im Systemansatz

Das industrielle Gleichstromnetz entpuppt sich als wichtiger Baustein der Energiewende. Die optimierte Systemgestaltung – konsequente Integration von Erzeugung, Speicherung und Verbrauch des Stroms – eröffnet weitere Chancen einer zusätzlichen Effizienzsteigerung, sowohl bei einzelnen Geräten als auch in deren Zusammenspiel als System. Funktionen, die einzelne Geräte nicht oder nur mit hohem Aufwand leisten können, werden auf Systemebene, im Zusammenspiel einer Vielzahl von Geräten, als Dienstleistungen des Fabriknetzes realisiert. Hierzu zählen beispielsweise die erwähnte Absicherung gegen Kurzzeitunterbrechungen, aber auch die wirtschaftliche Optimierung der Betriebsweise des eigenen Stromnetzes durch Spitzenlastreduktion oder atypische Netznutzung. Das Fabriknetz verhält sich zunehmend netzdienlich und leistet so einen wichtigen Beitrag zur Sicherung unserer Stromversorgung.

Da Gleichstrom auch die Grundlage für Elektrofahrzeuge bildet, entsteht hier Synergie. Angeschlossene Fahrzeuge können im Fall von Kurzzeitunterbrechungen in der Fabrik als Speicher genutzt werden. Dabei kann auf die verlustreiche Wandlung über das AC-Netz verzichtet werden. Zusätzlich steuert die Regelung des Microgrid das Laden der angeschlossenen Fahrzeuge und ermöglicht so eine Vermeidung von zusätzlichen, teuren Spitzenlasten und eine optimale Nutzung des lokal erzeugten grünen Stroms.

*Ja, Gleichstromnetze werden kommen und
DC-INDUSTRIE ebnet den Weg dafür.*

3 DC-INDUSTRIE – einfach erklärt

DC-INDUSTRIE stellt eine Spezifikation für ein offenes, einfaches Energieversorgungssystem für Anwender und Hersteller von Geräten eine schnelle Umsetzbarkeit zur Verfügung. DC-INDUSTRIE bereitet die Struktur eines intelligenten Versorgungsnetzes vor, um die wichtigsten Vorteile von Industrie 4.0, wie Erweiterbarkeit, Informationsbereitstellung und Selbstorganisation, auch in Produktionsanlagen erreichen zu können.

Mit dieser Struktur werden hohe Energieeffizienz, einfache Anbindung von erneuerbaren Energiequellen, Energieflexibilität und hohe Verfügbarkeit für die Anwender ermöglicht.

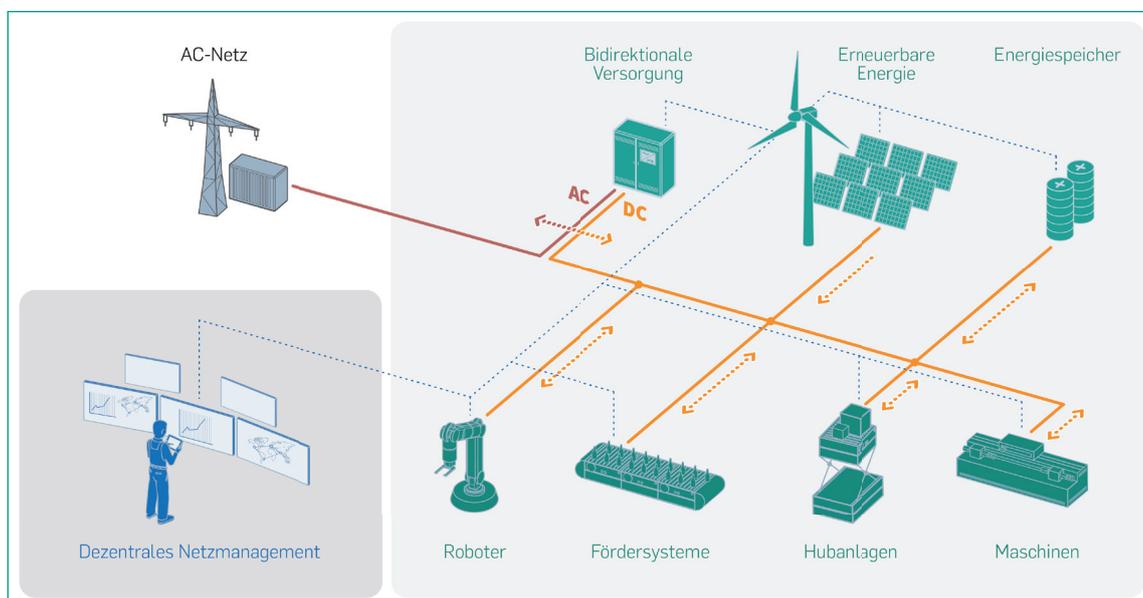
Die Betriebsspannung liegt im Bereich von 485 V bis 750 V, abhängig von der Art der Spannungsregelung (aktiv oder passiv). Mit diesem Spannungsbereich ist sichergestellt, dass weitgehend Standardtechnologien und -komponenten verwendet werden können. Bei Überschreiten der oberen Spannungsgrenze von 800 V bzw. bei Unterschreiten der unteren Grenze von 400 V wird das Netz abgeschaltet.

Die aktiven Komponenten im DC-Netz sorgen für die kontinuierliche Balance zwischen Energieangebot und Energienachfrage. Dazu wird regelmäßig die Spannung gemessen und mit einer vorgegebenen Strom-Spannungs-Kennlinie verglichen. Bei einem Überangebot von Energie steigt die Spannung und es werden Speicher gefüllt, die bei höherem Energiebedarf (und entsprechend sinkender Spannung) als Energiequelle genutzt werden. Mit diesen Kennlinien kann auch die Priorität der mit Strom zu versorgenden Geräte gesteuert werden. So werden z. B. kritische Anwendungen im gesamten Spannungsbereich vorrangig versorgt, während nachrangige Verbraucher bei geringerem Energieangebot abgeschaltet werden können.

Bild 3 gibt einen Überblick über das industrielle DC-Netz, das im Projekt DC-INDUSTRIE umgesetzt wurde. Alle Komponenten werden über ein DC-Netz miteinander gekoppelt und können so direkt Energie austauschen. Die Anbindung an das AC-Versorgungsnetz erfolgt über einen bidirektionalen Gleich- und Wechselrichter. Aktives Netzmanagement ermöglicht es, die Energienutzung in Echtzeit zu regeln – dies ist aber für den Betrieb des Netzes nicht notwendig.

Speicher in der Anlage, wie Kondensatoren, Batterien und Schwungmassenspeicher, stellen Energie zum Überbrücken von Störungen, wie z. B. Netzausfall, bereit. Sie können auch Leistungsspitzen abfedern und damit die Anschlussleistung der Fabrik reduzieren.

Bild 3: DC-Netz in der Industrie mit Anbindung von erneuerbaren Energien und Energiespeichern



Quelle: ZVEI

4 Was wurde bisher erreicht?

Im Rahmen des Forschungsprojektes DC-INDUSTRIE wurden vier Modellanlagen, die technologisch realen Produktionsanlagen gleichen, mit DC-Komponenten unterschiedlicher Hersteller ausgerüstet und erfolgreich in Betrieb genommen. Die Energieversorgung erfolgte vollständig durch Gleichspannung. Zusätzlich zu elektrischen Antrieben, z. B. für Roboter und leistungsstarke Anwendungen wie z. B. Schweißen, wurden Energiespeicher in die Anlagen integriert.

1. In zahlreichen Tests konnte die einwandfreie Funktionsweise jeder Anlage nachgewiesen werden. Bei einer Anlage konnte die Anschlussleistung um 85 Prozent gesenkt werden.

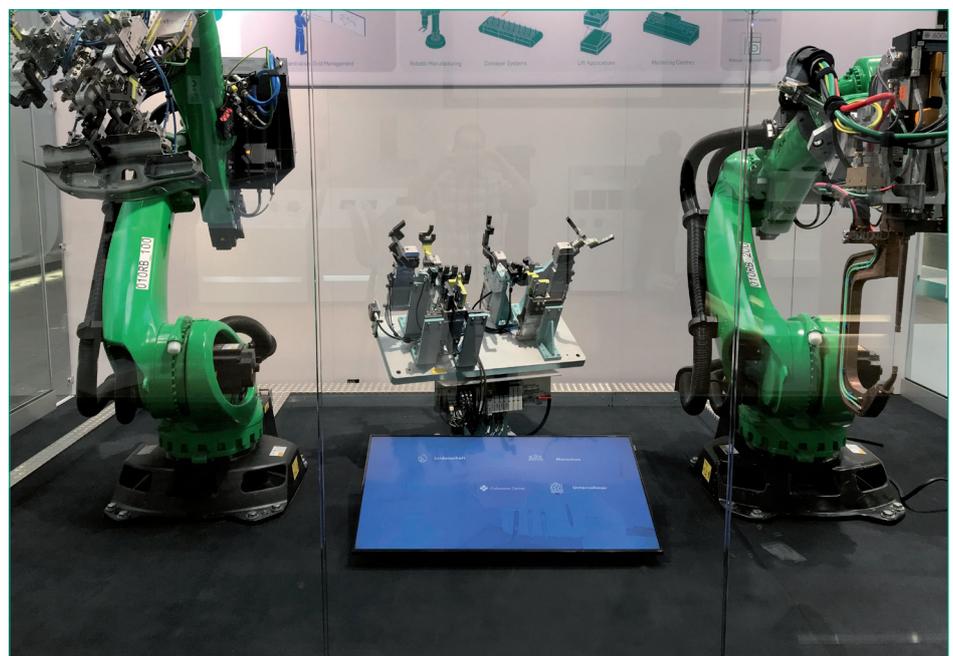
Neben Gerätekosten durch z. B. etwa ein Viertel kleinere Umrichter können auch Energiekosten über das Leistungsentgelt für die bereitgestellte Leistung gesenkt werden. Die Energieeinsparung betrug zwischen 6 und 8 Prozent für die Gesamtanlage.

2. Noch wichtiger als die Energieeinsparung ist für die industrielle Produktion die Reduzierung von Produktionsausfallzeiten bei Störung der Energieversorgung. Die einfach integrierbaren Speicher stellen genug Energie bereit, um Maschinen und Roboter in einen vorher definierten Anfangszustand zu bringen. Damit kann bei Wiederkehr der Energieversorgung die Produktion sehr schnell wieder aufgenommen werden.
3. Abgesehen von der Energieeinsparung werden weitere Ressourcen eingespart. So reduziert sich der Kupferbedarf einer DC-Leitung um ca. 40 Prozent durch den Wegfall von zwei Adern im Drei-Leiter-DC-Netz – gegenüber einem Fünf-Leiter-AC-Netz. Außerdem werden bis zu 25 Prozent weniger Isoliermaterial benötigt. Dies führt zu einer Reduktion um bis zu 38 kg CO_{2e} pro Kilometer Leitung (bei der Herstellung).

Durch den Wegfall von zahlreichen Gleichrichtern in den Antriebsreglern sowie durch eine Reduzierung der zentralen Einspeiseleistung lassen sich Elektronikbauteile einsparen. Für eine Werkzeugmaschine können so zusätzlich etwa 100 kg CO_{2e} eingespart werden.

Die Funktionsfähigkeit von DC-INDUSTRIE konnten interessierte Besucher bereits auf der Hannover Messe 2019 erleben. Dort simulierten zwei DC-versorgte Industrieroboter den Schweißprozess eines Autobauteils, wie in Bild 4 zu sehen ist.

Bild 4: DC-versorgte Industrieroboter auf dem Stand von DC-INDUSTRIE auf der Hannover Messe 2019



Quelle: DC-INDUSTRIE

5 Wie geht es weiter mit industriellen Gleichstromnetzen?

Die bisherigen Ergebnisse des Projekts DC-INDUSTRIE sind 2020 im Fachbuch „Die Gleichstromfabrik“ beim Hanser Verlag veröffentlicht worden. Es richtet sich an Entscheider und Fachleute, die sich tiefer mit der industriellen Gleichstromtechnik beschäftigen wollen.

DC-INDUSTRIE 2 baut direkt auf DC-INDUSTRIE auf. Hier wird das DC-Netz zu einem intelligenten DC-Netz für eine Produktionshalle bzw. eine Großanlage ausgeweitet. Zugleich soll die Anbindung an das übergeordnete Versorgungsnetz so verbessert werden, dass bei fluktuierender Energieerzeugung und maximaler Nutzung dezentraler erneuerbarer Energie jederzeit die Produktion sichergestellt wird und darüber hinaus auch Energie an das Versorgungsnetz geliefert werden kann. Dies wird auch als „Netzdienlichkeit“ bezeichnet.

Die Schwerpunkte der Arbeit sind

- Weiterentwicklung der Installations-, Schutz- und Gerätetechnik,
- Optimierung des Zusammenspiels der Betriebsmittel,
- Entwicklung von Werkzeugen und Methoden im Bereich der Projektierung und
- Reduzierung von Rückwirkungen auf das AC-Versorgungsnetz.

Damit soll der große Nutzen eines intelligenten DC-Netzes in Bezug auf Energieeffizienz, Ressourcenschonung, Verfügbarkeit und Netzdienlichkeit für die Produktionstechnik noch schneller verfügbar werden.

Der Umgang mit Gleichspannung soll einem breiten Fachpublikum durch sogenannte Transferzentren vermittelt werden. Transferzentren des Projekts DC-INDUSTRIE 2 sind Modellanlagen an Hochschulen und Forschungseinrichtungen, in denen Fachleute die Vorteile des DC-Netzes direkt erleben können. Dort soll insbesondere auch der Personenschutz behandelt werden. Für Gleichspannung gilt hier das gleiche, bekannte Regelwerk wie für Wechselspannung. Der Personenschutz basiert auf fünf Sicherheitsregeln, die beispielsweise in der Norm DIN VDE 0105-100 beziehungsweise IEC 60364 für Wechsel- und Gleichspannung beschrieben sind. Damit ist ein sicherheitstechnisches Regelwerk für Gleichspannung bereits vorhanden. Nachholbedarf besteht aber wohl in der Weiterbildung der Elektrofachkräfte und Elektroingenieure im Umgang mit Gleichspannung, um Vorbehalte wegen der aktuell geringen Erfahrung mit Niederspannungs-Gleichstromnetzen abzubauen. Dazu leisten diese Zentren einen niederschweligen Beitrag.

Verfügbarkeit der Komponenten des DC-Netzes am Markt:

- Antriebsumrichter benötigen nur wenige Anpassungen, um am DC-Netz betrieben werden zu können.
- DC-Leitungen sind bereits am Markt verfügbar.
- Für die Schutz- und Schalttechnik sind tragfähige Konzepte und Erfahrungen aus Bereichen wie Fotovoltaikanlagen oder Bahntechnik vorhanden.
- Versorgungsgeräte sind aus Antriebsverbänden und Solaranlagen bekannt und benötigen nur geringe Anpassungen. Zukünftig werden Weiterentwicklungen zur Effizienzsteigerung oder für den Einsatz von unterschiedlichen Netzformen sowie zur Bereitstellung von Mehrwertdiensten, z. B. der Filterung, dazukommen.

6 Weitere Info & Links

- DC-INDUSTRIE online: www.dc-industrie.de
- Interaktive Präsentation von der Hannover Messe 2019:
<https://experience.dc-industrie.zvei.org/>
- Präsentation zu den Ergebnissen von DC-INDUSTRIE:
https://dc-industrie.zvei.org/fileadmin/DC-Industrie/Praesentationen/180202_DC-INDUSTRIE_DC_grid_concept_A04w.pdf
- Präsentation zu DC-INDUSTRIE 2:
https://dc-industrie.zvei.org/fileadmin/DC-Industrie/Praesentationen/DCI2_Projektvorstellung.pdf
- Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V.: <https://www.zvei.org>
- YouTube-Serie "Watts On" des ZVEI zu Gleichstrom:
<https://www.youtube.com/watch?v=CnROW7eNFAA>
- Buch „Die Gleichstromfabrik“ beim Hanser Verlag:
<https://www.hanser-fachbuch.de/buch/Die+Gleichstromfabrik/9783446465817>



Quelle: Sauer, Gleichstromfabrik © 2020 Carl Hanser Verlag München



Forschungsprojekt DC-INDUSTRIE
c/o ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik-
und Elektronikindustrie e.V.
Lyoner Straße 9
60528 Frankfurt am Main
Telefon: +49 69 6302-0
Fax: +49 69 6302-317
E-Mail: zvei@zvei.org
www.zvei.org